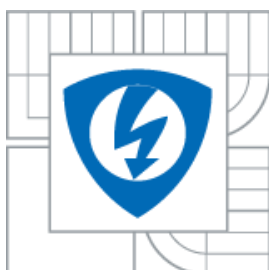




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# **KVANTIFIKACE ENERGETICKÝCH ZTRÁT FOTOTERMICKÉHO SYSTÉMU OHŘEVU TUV PŘI NAPÁJENÍ FOTOVOLTAIKOU**

QUANTIFICATION OF ENERGY LOSS IN PHOTOTHERMIC SYSTEM OF HOT WATER  
SUPPLY IN PHOTOVOLTAICS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

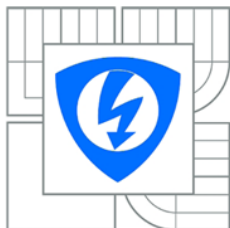
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. Lukáš Havlíček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Lukáš Havlíček  
**Ročník:** 2

**ID:** 120692  
**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Kvantifikace energetických ztrát fototermického systému ohřevu TUV při  
napájení fotovoltaikou**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je kvantifikace ztrát fototermického systému ohřevu teplé užitkové vody (TUV). Během měření fototermického solárního systému (viz [1]) bylo zjištěno nedostatečné energetické zabezpečení chodu systému během slabé intenzity slunečního záření. Navrhněte a po konzultaci s vedoucím projektu realizujte vhodnou měřicí a řídicí sestavu, která bude sto kvantifikovat energetické ztráty, ke kterým kvůli nerozběhnutí čerpadla ve stávajícím systému dochází a zároveň měřit a zaznamenávat celkový energetický zisk solárního systému. Vypracujte matematický model solárního systému pro termický ohřev TUV a vypočítejte teoretický nárůst výkonu při napájení čerpadla z nezávislého zdroje. Na základě srovnání výsledků simulace a změřených dat vyčíslete podíl těchto ztrát vzhledem k celkovému dlouhodobému energetickému zisku solárního systému. Zhodnoťte, zda jsou tyto ztráty natolik významné, aby se vyplatila změna instalace stávajících fotovoltaických panelů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MÍČKOVÁ, Petra. Kvantifikace energetického přířosu řídicí jednotky solárního systému : bakalářská práce. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 45 l, 27 l. a 1 CD-ROM příl. Vedoucí bakalářské práce Václav Zeman.
- [2] MATUŠKA, Tomáš. Solární zařízení v příkladech. 1. vyd. Praha : Grada, 2013. ISBN 978-80-24-73525-2.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 30.5.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:** Ing. Martin Knotek

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
Předseda oborové rady

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá kvantifikací energetických ztrát v solárním systému pro ohřev TUV při napájení fotovoltaiou. Během měsíce květen 2014 bude probíhat sběr dat na reálné instalaci systému a na základě tohoto měření budou provedeny výpočty.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Solární systém, TUV, raspberry pi, solární panely, sluneční kolektory, sluneční energie, kvantifikace ztrát

## **ABSTRACT**

This masters's thesis is about quantify of energy losses in the solar system for heating of hot water by energy from photovoltaics. During the April in year 2014 will be realized a practical data collection on the real system. Then, based on these measurements, calculations will be performed.

## **KEYWORDS**

Solar System, TUV, raspberry pi, solar panels, solar collectors, solar energy, quantification of losses

HAVLÍČEK, L. *Kvantifikace energetických ztrát fototermického systému ohřevu TUV při napájení fotovoltaiou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Kvantifikace energetických ztrát fototermického systému ohřevu TUV při napájení fotovoltaičkou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Václavu Zemanovi, Ph.D a panu Ing. Martinu Knotkovi ze společnosti Honeywell za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Sluneční energie</b>	<b>2</b>
2.1 Slunce jako zdroj energie.....	2
2.2 Dopad slunečního záření na zemský povrch.....	2
2.3 Vhodná orientace a umístění panelů .....	4
<b>3 Solární kolektory</b>	<b>5</b>
3.1 Fototermické kolektory .....	5
3.2 Druhy solárních kolektorů .....	6
<b>4 Charakteristiky solárních kolektorů</b>	<b>9</b>
4.1 Teoretické vyjádření účinnosti kolektoru .....	9
<b>5 Fotovoltaické panely</b>	<b>12</b>
5.1 Princip fotovoltaického článku .....	12
5.2 Typy fotovoltaických článků .....	12
5.3 Dostupné fotovoltaické články .....	13
5.4 Křemíkové monokrystalické články .....	13
5.5 Fotovoltaické články z polykrystalického křemíku .....	13
5.6 Fotovoltaické články z amorfního křemíku .....	14
5.7 Nové směry vývoje fotovoltaických článků .....	14
5.8 Elektrické vlastnosti fotovoltaických článků .....	15
5.9 Solární fotovoltaické panely .....	16
5.10 Možnosti zvýšení účinnosti fotovoltaických panelů.....	16
5.11 Antireflexní vrstvy a textura povrchu .....	17
5.12 Průhledné kontakty .....	17
5.13 Oboustranné panely .....	17
5.14 Natáčení panelů za sluncem.....	17
5.15 Koncentrátory .....	18



<b>6</b>	<b>Solární tepelné soustavy</b>	<b>19</b>
6.1	Rozdělení solárních systémů .....	19
6.1.1	Samotížný solární systém pro ohřev TUV .....	19
6.1.2	Hnaný solární systém pro ohřev TUV – nepřímý ohřev.....	20
6.1.3	Hnaný solární systém pro ohřev TUV – přímý ohřev .....	20
6.1.4	Hnaný solární systém pro ohřev TUV a bazénu .....	21
6.1.5	Hnaný solární systém pro ohřev TUV a přitápění .....	21
6.2	Průtok solární soustavou .....	22
6.3	Primární okruh .....	22
<b>7</b>	<b>Popis měřeného systému</b>	<b>24</b>
7.1	Solární kolektory.....	24
7.2	Akumulační zásobník .....	25
7.3	Oběhové čerpadlo .....	25
7.4	Řídící jednotka.....	25
7.5	Fotovoltaické články.....	26
7.6	Ostatní části systému .....	26
<b>8</b>	<b>Popis měřicí metody</b>	<b>27</b>
8.1	Hlavní komponenty měřicího systému .....	27
8.2	Zapojení měření .....	27
8.3	Program a jeho funkce .....	28
8.4	Přístup k datům .....	28
<b>9</b>	<b>Výpočet teoretických hodnot tepelného výkonu</b>	<b>30</b>
9.1	Vytvoření modelového dne.....	30
9.2	Teoretický výpočet denního výkonu a ztrát.....	33
9.3	Výpočet denního ztrátového výkonu .....	33
9.4	Ukázka výpočtu denních ztrát.....	35
<b>10</b>	<b>Vyhodocení naměřených dat</b>	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
	<b>Literatura</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam veličin, symbolů a zkratk</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>47</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Poměr přímého a difúzního slunečního záření během roku [2].....	3
Obr. 2.2: Roční úhrn slunečního záření pro území ČR [2].....	4
Obr. 3.1: Řez solárním kolektorem [3].....	5
Obr. 3.2: Rozdělení solárních kolektorů.....	6
Obr. 3.3: Bazénové absorbéry jako rohože z materiálu odolného vůči UV záření [4].....	6
Obr. 3.4: Trubkové jednostěnné vakuové kolektory: s přímo protékajícím koncentrickým potrubím (vlevo), s tepelnou trubicí (vpravo)[4].....	7
Obr. 3.5: Koncentrační solární kolektory pro aplikace v budovách: trubkový Sydney kolektor s reflektorem (vlevo), solární kolektor s lineární Fresnellovou čočkou (vpravo) [4].....	8
Obr. 4.1: Křivka účinnosti solárního kolektoru s vyznačením optických a tepelných ztrát [1].....	10
Obr. 6.1: Samotížný solární systém .....	19
Obr. 6.2: Hnaný solární systém pro ohřev TUV – nepřímý ohřev .....	20
Obr. 6.3: a) zásobník typu SISS; b) zásobník typu PAST .....	22
Obr. 7.1: Blokové schéma měřeného systému .....	24
Obr. 8.1: RPi s A/D převodníkem .....	27
Obr. 8.2: Principiální zapojení měření .....	28
Obr. 8.3: Ukázka naměřených dat.....	29
Obr. 9.1: Ukázka webu Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [9].....	30
Obr. 9.2: Výstupní hodnoty ze PVGIS [9].....	31
Obr. 9.3: Závislost tepelného výkonu na denní době.....	32
Obr. 10.1: Hodnoty výkonů ze dne 17. 5. 2014.....	37
Obr. 10.2: Hodnoty výkonů ze dne 18. 5. 2014.....	38
Obr. 10.3: Hodnoty výkonů ze dne 22. 5. 2014.....	38
Obr. 10.4: Hodnoty výkonů ze dne 20. 5. 2014.....	39
Obr. 10.5: Hodnoty výkonů ze dne 27. 5. 2014.....	39
Obr. 10.6: Hodnoty výkonů ze dne 25. 5. 2014.....	40
Obr. 10.7: Hodnoty výkonů ze dne 26. 5. 2014.....	41

# SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Hodnoty celkového slunečního ozáření [1].....	3
Tab. 9.1: Ukázka naměřených hodnot .....	35
Tab. 10.1: Přehled tepelných výkonů .....	41

# 1 ÚVOD

V dnešní době se stále více zabýváme ekologickými zdroji energie. Jedním z nejlépe dostupných zdrojů je sluneční záření dopadající na zemský povrch. Abychom dokázali toto záření přeměnit na využitelnou energii, potřebujeme k tomu solární kolektory. Ty existují ve dvou základních typech. Fotovoltaické kolektory mění sluneční záření na elektrickou energii a fototermické kolektory ze Slunce získávají tepelnou energii. Dále se nám také nabízí otázka, co s energií ze solárních kolektorů, kterou nedokážeme momentálně spotřebovat. V případě elektrické energie je možností několik. Tuto přebytečnou energii můžeme dodat do elektrické sítě a k jejímu využití dojde na jiném místě, nebo tuto energii můžeme uskladnit v bateriích a využít ji v jiný čas například k osvětlení. Máme-li takto přebytečnou tepelnou energii možností je už méně. Nejvýhodnějším z nich se nabízí tepelnou energii přenést pomocí média do zásobníku a poté dále využívat pro různé účely.

V této diplomové práci se budeme zabývat ztrátami systému ohřevu TUV ze Slunce. Jedná se o systém od firmy Vermos s.r.o, který je namontován na rodinném domě poblíž Brna. Systém je zcela nezávislý na elektrické síti, protože o napájení řídicí jednotky a oběhového čerpadla se stará dvojice malých fotovoltaických panelů. Hlavním záměrem je vyčíslit ztráty v době malého slunečního svitu (zejména na jaře nebo na podzim), kdy by fototermické panely již mohly dodávat do zásobníku tepelnou energii, ale fotovoltaické panely nemají dostatečný výkon k napájení jednotky a rozběhu čerpadla. Měření bude probíhat na již zmiňované instalaci systému v Židlochovicích v měsíci květen 2014.

## 2 SLUNEČNÍ ENERGIE

### 2.1 Slunce jako zdroj energie

Zdrojem energie Slunce je termonukleární reakce – jaderná fúze – probíhající v centrální oblasti Slunce, při které dochází k přeměně lehčích jader vodíku na těžší jádro helia. Přeměna probíhá při teplotách desítek milionů K a tlacích desítek miliard MPa za stavu, při němž jsou všechny atomy ionizovány. Každou sekundu se přemění 564 miliónů tun vodíku na 560 miliónů tun helia. Hmotnost vzniklého jádra helia je menší než hmotnost čtyř protonů vodíku vstupujících do reakce. Rozdíl hmoty se při reakci přemění na energii. Vyčíslením vznikajícího výkonu lze dospět k hodnotě  $3,6 \times 10^{26}$  W. Pro naše měřítka je to nepředstavitelný výkon, který Slunce uvolňuje přeměnou hmoty v energii [1].

Slunce vyzařuje energii okolo  $60 \text{ MW/m}^2$ . Díky rozptylu energie do většího prostoru dopadne na naši planetu „jen“ asi  $1,8 \times 10^{17}$  W. To je obrovské množství energie a bylo by velkou chybou, kdybychom alespoň jeho malou část nevyužili ku prospěchu lidstva. Na základě dlouhodobých satelitních měření energie, která dopadne ze Slunce na Zemi (resp. na vnější povrch zemské atmosféry), byla ustanovena sluneční konstanta o střední hodnotě  $1367 \text{ W/m}^2$ .

### 2.2 Dopad slunečního záření na zemský povrch

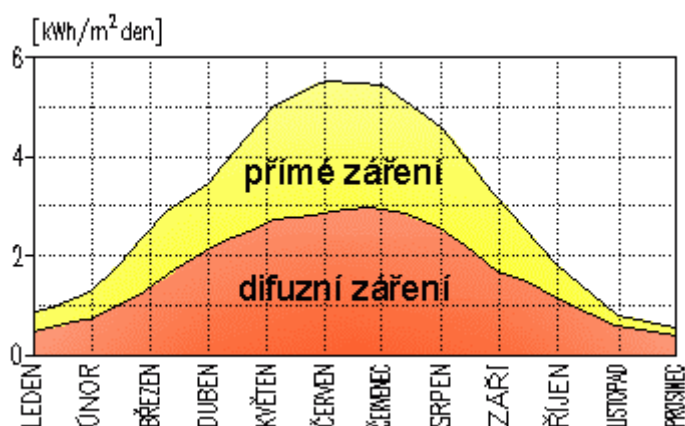
Sluneční záření dopadající do horních vrstev naší atmosféry dopadá v nerozptýlené formě (do té doby se šířilo vzduchoprázdňem) a považujeme jej za přímé sluneční záření. Část záření v případě jasné oblohy, dopadne v této formě také na zemský povrch. Takové záření má výrazně směrový charakter a můžeme si jej představit jako sluneční paprsky dopadající ze Slunce přímo na zemský povrch. Část slunečního záření díky rozptylu v atmosféře dopadne na povrch ve formě difuzního (rozptýleného) záření. Takové záření je všesměrové, má tedy ve všech směrech stejnou intenzitu. V rámci difuzního záření také uvažujeme záření odražené od okolního terénu a překážek.

Rozlišují se dvě základní veličiny popisující energický obsah slunečního záření: jednak výkonová hustota zářivého toku slunečního záření, označovaná jako sluneční ozáření  $G$  ve  $\text{W/m}^2$  a dále hustota dopadající energie za časový úsek, označovaná jako dávka slunečního ozáření  $h$  v  $\text{kWh/m}^2$  [1].

	$G = G_b + G_d$	Poměr $G_b / G$
Jasná obloha	700 - 1000 W/m <sup>2</sup>	10 - 20 %
Lehce zataženo	200 - 700 W/m <sup>2</sup>	20 - 80 %
Silně zataženo	100 - 200 W/m <sup>2</sup>	80 - 100 %

Tab. 2.1: Hodnoty celkového slunečního ozáření [1]

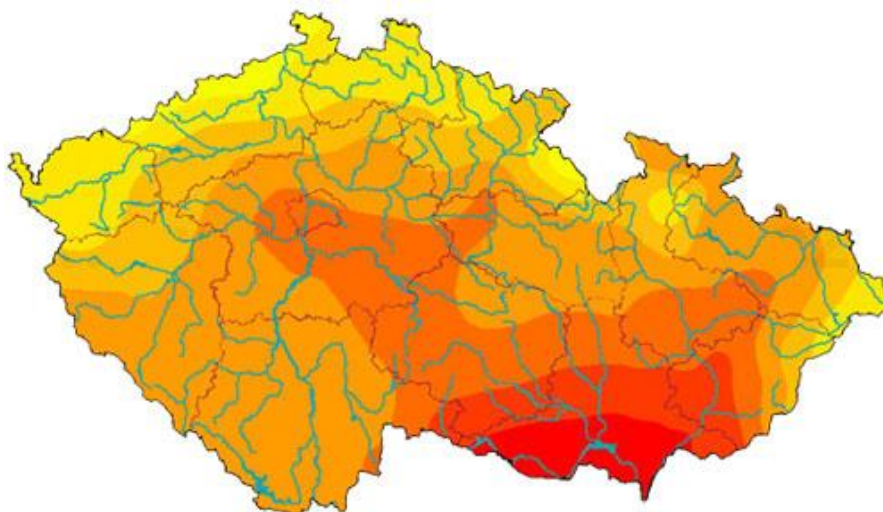
V tab. 2.1 jsou uvedeny typické hodnoty celkového slunečního záření  $G$  pro různé stavy oblačnosti. Celkové sluneční ozáření  $G$  je součtem přímého slunečního ozáření  $G_b$  a difúzního slunečního ozáření  $G_d$ . Úrovně slunečního ozáření jsou podmíněny ročním obdobím pouze částečně, zejména však aktuální oblačností a sklonem přijímací plochy [1].



Obr. 2.1: Poměr přímého a difúzního slunečního záření během roku [2]

Obrázek 2.1 znázorňuje podíl přímého a difúzního slunečního záření. Nejmenší podíl má difúzní záření během letních měsíců, naopak největšího podílu dosahuje během zimních měsíců. Tento podíl fakticky závisí na počtu slunečných a zamračených dní. Celoroční podíl difúzního záření v našich zeměpisných šířkách je okolo 60 %.

V České republice dopadne nejvíce slunečního záření na oblast jižní Moravy. Z obrázku 2.2 je patrný poměrně veliký rozdíl mezi nejvíce osvětlenými jižními oblastmi, kde dopadá na povrch až 1337 kWh/m<sup>2</sup> záření oproti oblastem v severní části republiky s 940 kWh/m<sup>2</sup> dopadajícího záření.



Obr. 2.2: Roční úhrn slunečního záření pro území ČR [1]

## 2.3 Vhodná orientace a umístění panelů

Významný podíl na množství přeměněné sluneční energie solárními kolektory má také jejich sklon a azimut. Optimální orientace plochy solárních panelů je jižní.

Mezi optimálním sklonem uváděným pro fotovoltaické kolektory a tepelné kolektory je zdánlivý nesoulad. Přestože obě zařízení jímají sluneční energii, pro fotovoltaiku se prosazuje sklon  $35^\circ$ , zatímco pro solární tepelné soustavy se za optimum považuje  $45^\circ$ . Je to dáno převažující aplikací obou zařízení. Fotovoltaické systémy jsou převážně navrhovány na provoz s dodávkou elektrické energie do rozvodné sítě jako do „nekonečného“ akumulátoru a účelem návrhu je maximalizovat produkci elektrické energie bez ohledu na současnou využitelnost. V solárních soustavách se naopak vyšším sklonem využití solárního tepla optimalizuje, přizpůsobuje se spotřebě tepla, zmírňují se letní nevyužitelné přebytky a zvyšuje se produkce v přechodovém období. Solární soustavy se zásadně vybavují denními nebo vícedenními zásobníky tepla [1].

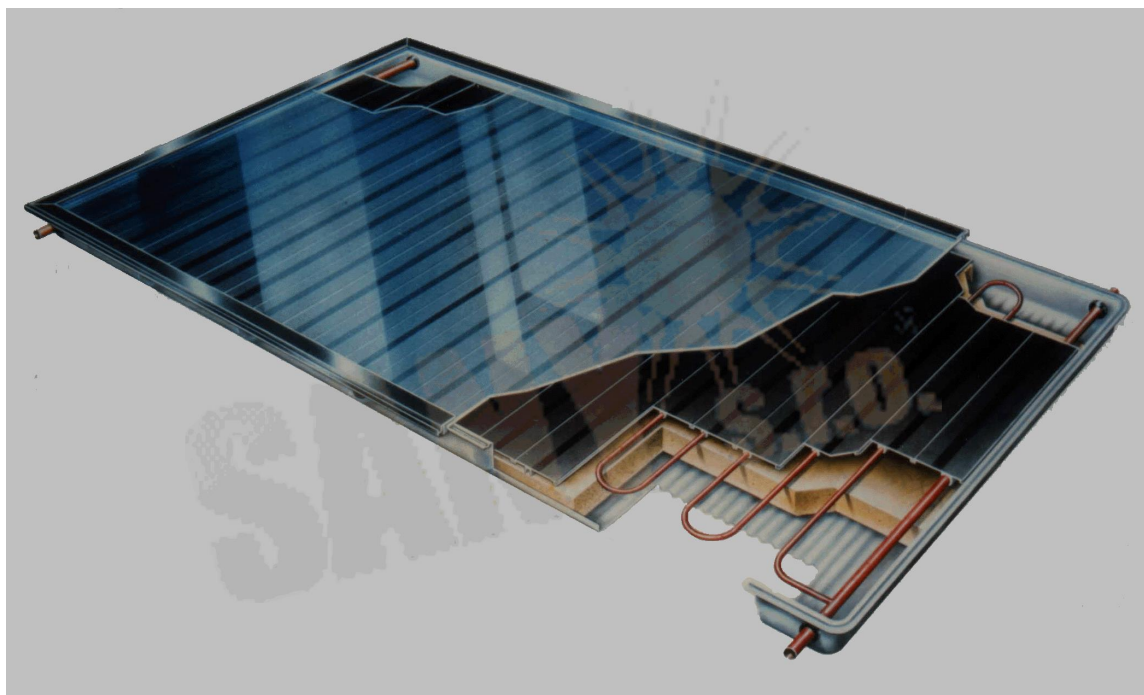
V reálné instalaci se však můžeme setkat i s jinými faktory, které sníží výkon solárních panelů, a proto nemusí být optimální orientaci nejvýhodnějším řešením. Jedním z takových faktorů je částečné nebo úplné zastínění solárních kolektorů terénní nebo jinou překážkou. Dalším problémem je umístění panelů poblíž velkého zdroje prachu, případně v oblasti s častým výskytem mlh.

## 3 SOLÁRNÍ KOLEKTORY

### 3.1 Fototermické kolektory

Fototermický neboli solární tepelný kolektor pohlcuje sluneční záření a mění ho na tepelnou energii, kterou předá teplonosnému médiu. Mluvíme tedy o fototermální přeměně, jedné z nejjednodušších cest jak zužít sluneční energii.

Fototermální přeměna spočívá v absorpci slunečního záření na povrchu tuhých látek a kapalin, kdy se energie dopadajících fotonů slunečního záření mění v teplo (pohyb molekul). Základním prvkem kolektoru je tedy absorpční plocha, která se pohlčováním slunečního záření ohřívá. Tepelná energie se z absorpčního povrchu odvádí různými teplonosnými látkami, zvláště kapalinami (voda, nemrznoucí směs) proudícími v kanálkové struktuře spojené s absorpčním povrchem, nejčastěji v podobě trubkového registru. Pro snížení tepelných ztrát z absorberu se využívá na přední straně kolektoru zasklení propouštějící sluneční záření. Zasklení omezuje jednak tepelné ztráty sáláním, neboť je nepropustné vůči dlouhovlnnému záření, a zároveň vytváří tepelný odpor mezi absorberem a okolním prostředím. Na zadní straně a bočních stranách absorberu nepřijímajících sluneční záření se ztrátám zabraňuje neprůhlednou tepelnou izolací uchycenou v rámu (skříni) kolektoru [1]. Na obrázku 3.1 je znázorněn řez solárním kolektorem firmy Sany s.r.o.

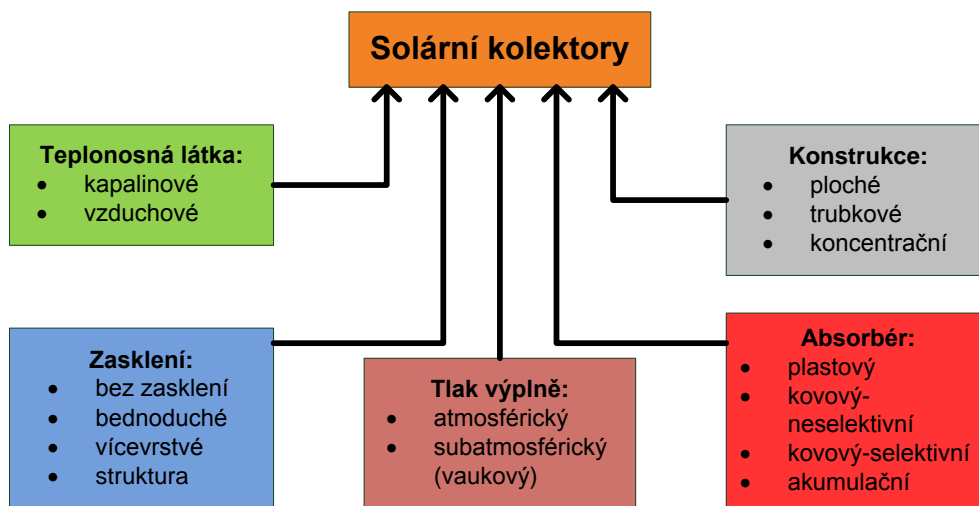


Obr. 3.1: Řez solárním kolektorem [3]



## 3.2 Druhy solárních kolektorů

Nejčastěji rozdělujeme kolektory, jak je uvedeno na obr. 3.2, podle použitého teplotního média. U nás se obvykle používají kolektory protékající teplotní kapalinou, která zajišťuje přenos tepla z kolektoru do zásobníku.



Obr. 3.2: Rozdělení solárních kolektorů

Solární kapalinové kolektory se podle konstrukčního uspořádání rozdělují na jednotlivé druhy, se kterými je možné se v praxi setkat:

- plochý nekrytý kolektor – zpravidla plastová rohož bez zasklení, nejčastěji využívaná pro sezonní ohřev bazénové vody o nízké teplotní úrovni [1],



Obr. 3.3: Bazénové absorbéry jako rohože z materiálu odolného vůči UV záření [4]

- plochý neselektivní kolektor – zasklený deskový kolektor s kovovým absorbérem se spektrálně neselektivním povlakem (např. černým

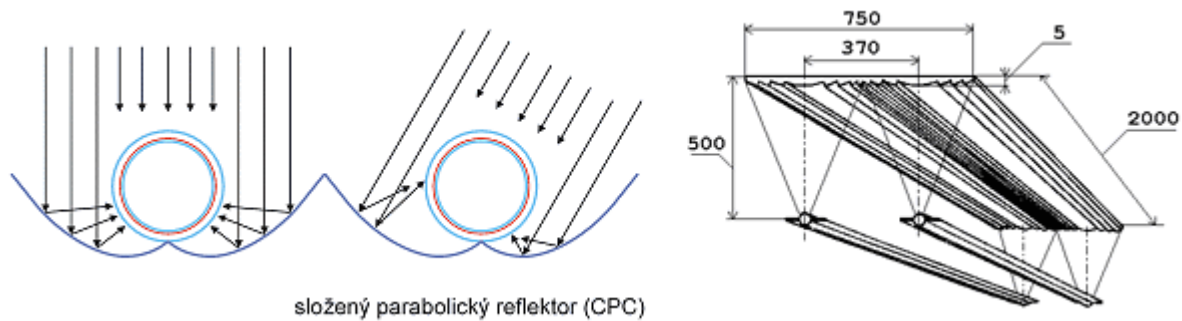
pohltivým nátěrem) určený pro sezonní přehřev vody o nízké teplotní úrovni,

- plochý selektivní kolektor – zasklený deskový kolektor s kovovým absorbérem se spektrálně selektivním povlakem, určený pro celoroční ohřev vody a vytápění,
- plochý vakuový kolektor – deskový kolektor s kovovým absorbérem se spektrálně selektivním povlakem a tlakem uvnitř kolektoru nižším (absolutní tlak cca 1 až 10 kPa) než atmosférický tlak v okolí kolektoru, určený pro celoroční ohřev vody a vytápění případně průmyslové aplikace s provozními teplotami okolo 100 °C,
- trubkový vakuový kolektor – kolektor s plochým nebo válcovým selektivním absorbérem umístěným ve vakuované (absolutní tlak < 1 mPa) skleněné trubici, s variantami předávání tepla do teplonosné látky: přímo protékaný registr nebo tepelná trubice, určený pro kombinované soustavy pro vytápění či průmyslové vysokoteplotní aplikace (provozní teploty nad 100 °C) [1],



Obr. 3.4: Trubkové jednostěnné vakuové kolektory: s přímo protékaným koncentrickým potrubím (vlevo), s tepelnou trubicí (vpravo) [4]

- trubkový dvojstěnný (Sydney) vakuový kolektor - kolektor s válcovým spektrálně selektivním absorbérem (absorpční skleněná trubka) umístěným ve vakuované skleněné trubce (absolutní tlak < 10<sup>-3</sup> Pa); vzhledem k problematickému zajištění přenosu tepla z absorpční trubky do teplonosné kapaliny pomocí hliníkové teplosměnné lamely se Sydney kolektory vyznačují obecně nižší účinností při nízkých teplotách (např. oproti plochým kolektorům) a používají se především pro kombinované soustavy pro vytápění či průmyslové vysokoteplotní aplikace (provozní teploty nad 100 °C) [4],
- soustředující (koncentrační) kolektor – obecně kolektor, ve kterém jsou použita zrcadla (reflektory), čočky (refraktory), nebo další optické prvky k usměrnění a soustředění přímého slunečního záření na absorber [1].



Obr. 3.5: Koncentrační solární kolektory pro aplikace v budovách: trubkový Sydney kolektor s reflektorem (vlevo), solární kolektor s lineární Fresnellovou čočkou (vpravo) [4]

## 4 CHARAKTERISTIKY SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

Při návrhu a hodnocení solárních kolektorů je nutné znát jejich hlavní parametry a závislosti na klimatických podmínkách:

- tepelná účinnost  $\eta$  indikuje, jak kolektor pohlcuje záření a ztrácí teplo, určuje jeho okamžitý tepelný výkon  $Q_k$  při daných klimatických a provozních podmínkách
- modifikátor úhlu dopadu  $K_\theta$  určuje vliv úhlu dopadu slunečního záření na účinnost a výkon solárního kolektoru, někdy se označuje jako optická charakteristika kolektoru
- časová konstanta  $T$  a tepelná konstanta  $C$  vyjadřuje vliv tepelné setrvačnosti hmot kolektoru na jeho okamžitý výkon [1].

### 4.1 Teoretické vyjádření účinnosti kolektoru

Funkci solárního tepelného kolektoru definujeme jako obecnou energetickou rovnováhu. Sluneční záření dopadající na solární kolektor se z části odrazí od zasklení a absorbérů. Zbylé sluneční záření se na povrchu absorbérů promění v teplo. V absorbérů dochází k tomu, že část tepla se odvede teplotnosným médiem do zásobníku, část tepla unikne z absorbérů do okolí a poslední část tepla se akumuluje přímo v kolektoru. Pro větší jednoduchost výpočtů nemusíme brát v potaz vliv setrvačnosti kolektoru. Celkovou účinnost solárního tepelného kolektoru tedy vypočteme podle vztahu 4.1 [1].

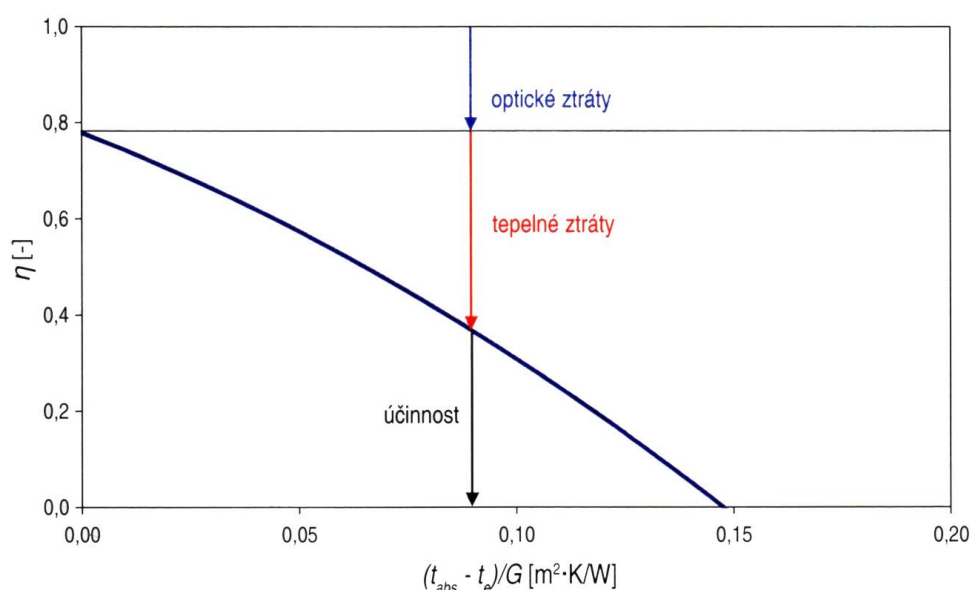
$$\eta = \frac{Q_k}{G \cdot A_k} = \tau \cdot \alpha - U \cdot \frac{(t_{abs} - t_e)}{G} \quad (4.1)$$

Kde je:

$G$	tepelný výkon solárního kolektoru [W],
$A_k$	vtažná plocha kolektoru [m <sup>2</sup> ],
$\tau \cdot \alpha$	optická účinnost kolektoru,
$U$	součinitel prostupu tepla kolektoru [W/(m <sup>2</sup> ·K)],
$\frac{(t_{abs} - t_e)}{G}$	střední redukovaný teplotní spád mezi povrchem absorbérů a okolím [m <sup>2</sup> ·K/W] [1].

Jak je ve vztahu 4.1 patrné, hlavními parametry, které ovlivňují účinnost kolektoru, jsou optická účinnost a součinitel prostupu tepla kolektoru vyjadřující celkové tepelné ztráty. Jak můžeme vidět na obrázku 4.1, s nárůstem teploty kolektoru jsou hlavními ztrátami ztráty z kolektoru do okolí. Při vyšších teplotách jsou tepelné ztráty čtvrtou mocninou rozdílu teplot.

Rovnicí 4.1 je účinnost kolektoru vyjádřena pouze na základě fyzikálních vlastností částí kolektoru vně absorberu, vlivu průtoku teplotnosné kapaliny atd. Vyjádření účinnosti kolektoru jako funkce střední teploty povrchu absorberu  $t_{abs}$  je proto problematické, neboť teplota povrchu absorberu zpravidla není známa a lze ji obtížně změřit bez demontáže zasklení kolektoru. Ve starší literatuře je teplota absorberu  $t_{abs}$  nesprávně slučována se střední teplotou teplotnosné kapaliny  $t_m$ . Měřením povrchových teplot lze prakticky ukázat, že mezi povrchem absorberu (střední teplotou) a teplotnosnou kapalinou je teplotní spád řádově jednotky (velmi vodivé, plnoprůtočné absorbery) až desítky K (konfigurace lamela-trubka) [1].



Obr. 4.1: Křivka účinnosti solárního kolektoru s vyznačením optických a tepelných ztrát [1]

Někdy je nutné vyjádřit kvalitu přenosu tepla z povrchu absorberu do teplotnosné kapaliny. K tomu se využívá účinnostní součinitel kolektoru  $F'$ , jenž určuje poměr mezi odporem přenosu tepla z kapaliny do okolního vzduchu a odporu proti přenosu tepla z povrchu absorberu do okolního vzduchu. Pro daný případ kolektoru je vždy účinnostní součinitel kolektoru konstantní.

Zavedením účinnostního součinitele kolektoru  $F'$  umožňuje rovnici účinnosti solárního kolektoru vyjádřit v závislosti na střední teplotě teplotnosné kapaliny  $t_m$  tak, jak to odpovídá evropské praxi (vztah 4.2) [1]. Z účinnostního součinitele kolektoru  $F'$  vyplývají důležité zásady návrhu konstrukce kolektoru [1].

$$\eta = \left[ \tau \cdot \alpha - U \cdot \frac{(t_{abs} - t_e)}{G} \right] \quad (4.2)$$

Kde je:

$F' \tau \alpha$  účinnost při nulových tepelných ztrátách, někdy nepřesně nazývaná optická účinnost

$F' U$  účinný součinitel prostupu tepla kolektoru [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]

$\frac{(t_{abs} - t_e)}{G}$  střední redukovaný teplotní spád mezi kapalinou a okolím [ $m^2 \cdot K/W$ ] [1].

Účinnost solárního kolektoru musí být vždy uváděna společně s označením plochy kolektoru  $A_k$ , ke které byla vztažena, lze rozlišit celkem tři plochy, ke kterým je možné vztáhnout účinnost solárního kolektoru:

- plocha absorberu  $A_A$  – plocha, na níž dochází cíleně k přeměně slunečního záření v teplo,
- plocha apertury  $A_a$  – plocha průmětu otvoru (zpravidla zasklení), kterým vstupuje do kolektoru nesoustředěné sluneční záření,
- celková obrysová (hrubá) plocha  $A_G$  – plocha průmětu celkového obrysu solárního kolektoru [1].

## 5 FOTOVOLTAICKÉ PANELY

### 5.1 Princip fotovoltaického článku

K přeměně energie proudu fotonů v energii pohybujících se elektronů potřebujeme volné elektrony a elektrické pole, které určí jejich směr pohybu (od zdroje k spotřebiči).

Záření se za určitých podmínek chová, jako by bylo tvořeno proudem částic. Albert Einstein je nazval fotony. Foton slunečního záření dokáže předat svou energii elektronu v kovu nebo v polovodiči. Samotný přenos energie ze záření na elektrony je tedy možný. Již od 19. století je známo, že pokud ozařujeme povrch kovu zářením, tak dochází k uvolnění elektronů z jeho povrchu. Pokud je energie záření dostatečná, elektron vylétne z povrchu kovu a zanechá po sobě v kovu kladný náboj – fyzikové jej nazývají dírou. Jde o tak zvaný fotoelektrický jev [5]. Poměrně snadno dosáhneme tohoto jevu, pokud proud fotonů dopadá na polovodičový přechod PN.

Použitý materiál k výrobě fotovoltaického článku určuje jeho napětí. V případě křemíku, jenž je nejčastějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků, je napětí článku 0,6 V, což odpovídá závěrnému napětí křemíkové diody. V podstatě lze na fotovoltaický článek nahlížet jako na velkoplošnou diodu. Abychom v praxi dosáhli použitelných napětí, jsou jednotlivé články spojovány do série.

Křemíkový článek může využít fotony s energií větší než cca 1,1 eV, což představuje záření o vlnové délce menší než 1100 nm (pro fotony platí, že čím je jejich vlnová délka kratší, tím větší mají energii). Sluneční záření procházející atmosférou obsahuje fotony s energiemi od 0,5 eV (infrachervené záření) do asi 2,9 eV (ultrafialové záření). Do oblasti využitelné křemíkovými články spadá velká část energie slunečního záření – to je také jeden z důvodů, proč se křemík používá [5].

Energie fotonů s kratší vlnovou délkou (větší energií) ale není využita beze zbytku. Každý foton uvolní jen jeden elektron a přebytek jeho energie se promění v teplo. V důsledku toho nelze principiálně dosáhnout s takovým článkem větší než 55 % využití energie záření. U reálného fotovoltaického článku jsou ještě další ztráty a v praxi se dosahuje účinnosti jen někde mezi 10 až 20 %.

### 5.2 Typy fotovoltaických článků

Z historického hlediska dělíme solární články na čtyři generace. Články první generace jsou vyráběny z destiček monokrystalického křemíku, kde je vytvořen velkoplošný přechod PN. První generace článků je stále velmi oblíbená. Jejich přednostmi je dobrá účinnost a dlouhodobá stabilita, naopak nevýhody jsou velká spotřeba čistého křemíku a velká náročnost výroby. Druhá generace článků je v podstatě snahou o snížení množství křemíku potřebného k výrobě a tím i zlevnění článků. Nejčastěji se setkáváme s články z polykrystalického, mikrokystalického nebo amorfního křemíku. Nevýhodami jsou nižší účinnost a menší stabilita v čase. Naproti tomu bylo při snaze uspořít co největší množství křemíku dosaženo poměrně tenkých článků a ty jsou ohebné, což má značné

výhody v některých aplikacích. Třetí generací rozumíme články, které využívají k separaci náboje jiných metod a často i jiných materiálů než polovodičů (např. fotochemické články). Zde se také začínají uplatňovat uhlíkové nanostruktury, které se však zatím příliš nepoužívají. Zatím poslední čtvrtou generaci článků tvoří kompozitní fotovoltaické články. Ty jsou složeny z jednotlivých vrstev a každá vrstva dokáže využít určitou část spektra slunečního záření.

### **5.3 Dostupné fotovoltaické články**

Většina (přes 90 %) komerčně dostupných fotovoltaických článků se vyrábí z křemíku. To, že křemík je v současnosti nejvíce používaným materiálem, souvisí do značné míry s tím, že se z něj dělá většina polovodičových součástek a technologie výroby křemíku potřebné čistoty je dobře zvládnutá. Poměrně vysoká cena tohoto materiálu je dána především požadavkem na velmi vysokou čistotu materiálu. Křemík pro elektroniku dosahuje čistoty 99,9999999 %. Křemík jako takový však není nikterak vzácný prvek – v zemské kůře je zastoupen 26 %. Do nedávné doby se pro výrobu fotovoltaických článků používal výlučně křemík, který nevyhovoval přísným požadavkům výrobců mikroelektroniky. V současné době už je ale spotřeba křemíku na výrobu fotovoltaických článků tak velká, že tento zdroj nestačí. Navíc křemík pro mikroelektroniku je čistší (a díky tomu také dražší), než je třeba pro fotovoltaiku [5].

### **5.4 Křemíkové monokrystalické články**

Základní a nejstarší typ fotovoltaických článků jsou články vyráběné z monokrystalického křemíku, tzn. rozměr krystalů je v řádu 10 cm (neznamená to, že by nemuselo jít o jeden neporušený krystal). Vyrábí se z ingotů (tyčí) polykrystalického křemíku zpravidla Czochralského metodou, tj. pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku [5].

### **5.5 Fotovoltaické články z polykrystalického křemíku**

Jde o dnes nejběžnější typ článků. Tyto články se vyrábí odléváním čistého křemíku do vhodných forem a řezáním vzniklých ingotů na tenké plátky. Odlévání je podstatně jednodušší metoda než tažení monokrystalu a lze také připravit bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem (lepší využití materiálu). Takto vyrobené články mají trochu horší elektrické vlastnosti (nižší proud a účinnost), protože na styku jednotlivých krystalových zrn (jejich rozměry jsou v řádu milimetrů) je větší odpor. Zásadní výhodou je ale to, že výchozí surovina je levnější a lze je vyrábět ve větších rozměrech a s obdélníkovým nebo čtvercovým tvarem. Tento typ článků má zajímavý vzhled. Viditelné hranice krystalů připomínají leštěný kámen a zdá se, že to je činí oblíbenými u architektů [5].



## 5.6 Fotovoltaické články z amorfního křemíku

Proces výroby je založen na rozkladu vhodných sloučenin křemíku (silanu nebo dichlorsilanu) ve vodíkové atmosféře. Tímto způsobem se dají připravit velmi tenké vrstvy křemíku na skleněné, nerezové nebo plastové (zpravidla polyamidové) podložce. Takto nanesená vrstva křemíku je amorfni, tj. nemá pravidelnou krystalickou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. Díky větší absorpci slunečního záření může být podstatně tenčí (už vrstva o tloušťce 1 mm pohltí 90 % slunečního záření). Takto lze připravovat velmi tenké a ohebné fotovoltaické články a moduly, které se dají používat jako krycí folie na střechy nebo našít na oblečení [5].

## 5.7 Nové směry vývoje fotovoltaických článků

I dnes se vyvíjejí stále nové typy fotovoltaických článků. Jedním z hlavních směrů vývoje je snižování množství křemíku (nebo jeho nahrazení) v článku a tím i zlevnění výroby.

Galiumarsenidové články jsou monokrystalické tenkovrstvé články, které je možné vyrobit s různými vlastnostmi (to dosáhneme změnou poměru galia a arsenu). Dalšími přednostmi těchto článků je vysoká absorpce (používají se tloušťky několika mikronů) a oproti křemíkovým článkům jsou méně citlivé na vyšší teploty, proto jsou vhodné k použití v systémech s koncentrátory záření. Taktéž se s GaAs-články můžeme setkat ve vícepřechodovém provedení fotovoltaických článků.

Články diselenid mědi a india se vyznačují vysokou absorptivitou pro sluneční záření, a mohou proto být velmi tenké (99 % slunečního záření se pohltí v prvním mikrometru tloušťky). Dosahují vysoké účinnosti (v laboratoři až 18 %, což je s ohledem na to, že to jsou tenkovrstvé články, poměrně vysoká hodnota). Na trhu jsou už články typu CIS v ceně 460 dolarů za 40 W panel. Používá se i varianta materiálu obsahujícího navíc galium (copper indium gallium diselenide [5]).

Další materiál pro výrobu článků je telurid kadmia. Je známe, že tento materiál má nejlepší vzdálenost valenčního a vodivostního pásu (1,44 eV) a vynikající absorptivitu. Tento materiál není lepší než křemík, výhodou je výroba tenkovrstvých článků a použití levných výrobních technologií.

Velmi zajímavým typem fotovoltaických článků jsou články využívající organické látky. Vývoj v oblasti organických fotovoltaických článků je zaměřen na nízkou cenu, pružnost a ohebnost článků. Vytvořil se celý obor „Flexible Electronics“, který využívá výhodných vlastností organických polovodičů k řadě jiných aplikací než jen k získávání energie. Zatím to ale vypadá tak, že organické fotovoltaické články jsou sice potenciálně velmi slibné a je zde ohromné množství možností, nicméně současně jde o obor velmi nepřehledný a prozatím také relativně málo prakticky využívaný [5].

Organické sloučeniny mohou být využity pro vytvoření fotovoltaických článků různými způsoby. Někdy se nazývají podle Greatzela (resp. Grätzela), který v 90. letech vytvořil díky použití ultra jemného  $\text{TiO}_2$  na tomto principu články s rozumně vysokou účinností. Tento článek se skládá z vrstvy vysoce porézního a vysoce jemného oxidu titaničitého (užívá se výrazu „nanokrystalický“, protože rozměry krystalků jsou v řádu desítek nanometrů), v němž je nasáknut vodný roztok elektrolytu obsahující redox

dvojici (např. jód/jodid) a vhodné barvivo (organický komplex ruthenia). Barvivo zachycením fotonu vytvoří excitovaný stav a elektron je přenesen na  $\text{TiO}_2$  (barvivo je tak přeneseno do oxidovaného stavu). Elektron „prosákne“ skrz strukturu  $\text{TiO}_2$  na průhlednou elektrodu a je odveden do vnějšího obvodu. Obvod je uzavřen tak, že na druhé elektrodě je elektron vstupující z vnějšího obvodu přenesen na jód, vytvoří se trijodidový anion a ten redukuje oxidovanou formu barviva, jež je tak připraveno na přijetí dalšího fotonu. Výhodou článků tohoto typu jsou menší nároky na čistotu použitých materiálů. Zásadní nevýhodou jsou potíže s kapalným korozivním elektrolytem, který musí být dokonale uzavřen, a se stabilitou použitého barviva, jež musí vydržet dlouhou dobu slunečního svitu a nesmí se rozkládat. V nedávné době bylo dosaženo účinnosti až 7,3 % [5].

Dnes jsou také známé technologie umožňující vyrobit dostatečně malé struktury zvané kvantové tečky. V takovýchto strukturách se uplatňuje jev „quantum confinement“, jenž umožňuje nastavit potřebnou velikost šíře zakázaného pásma. Zatím se spíše jedná o laboratorní pokusy, neboť účinnost takového článku zatím nepřesáhla 3 %.

Neméně zajímavé jsou články z vodivých polymerů. Jde o určitou analogii fotovoltaiických článků s p-n přechodem. Ve směsi vodivých polymerních molekul, z nichž jeden má elektronakceptorové vlastnosti a druhý elektrondonorové vlastnosti, dojde pohlcením fotonu ke vzniku vázaného páru elektron-díra a za určitých podmínek dojde k přenosu náboje na elektronakceptorovou molekulu. Jako elektrondonorovou molekulu lze použít například poly (3-oktyl-thiofen). Jako akceptor elektronů slouží uhlíková nanotrubička (např. komerčně dostupný CAR-BOLEX). Jde o neobyčejně zajímavou formu uhlíku. Je to vlastně jedna vrstva grafitu (tj. ortho-kondenzovaná benzenová jádra) svinutá do podoby duté trubice [5].

Jak už bylo výše zmíněno, existují také články s více PN přechody. Účinnost takového článku závisí jednak na tom, jakou část slunečního spektra můžeme využít, a dále na tom, jaká část energie fotonu se přemění na elektrický proud a jaká na teplo. Pokud je šíře zakázaného pásu malá, lze využít širší část spektra (skoro všechny fotony dokážou excitovat elektron, ale za cenu menšího napětí, a tedy i účinnosti). Pokud je šíře zakázaného pásu větší, pak je vyšší i fotovoltaiické napětí článku, ale nevyužijí se všechny fotony. Existuje tedy optimální šíře zakázaného pásu, při níž je účinnost článku maximální. Monokrystalické křemíkové články jsou velmi blízko tohoto optima [5]. Poměrně lepšího využití sluneční energie dosáhneme vytvořením vícevrstvé struktury, kde každá vrstva pracuje s určitou částí slunečního spektra. Teoreticky by mělo jít využít celé sluneční spektrum, což se projeví jako vysoká účinnost solárního článku. Takovéto několikavrstvé struktury jsou mnohem dražší než klasické křemíkové články a proto se nejčastěji používají v kombinaci s vhodnými koncentrátory záření, aby bylo dosaženo co nejlepší návratnosti nákladů při pořizování těchto článků.

## 5.8 Elektrické vlastnosti fotovoltaiických článků

Fotovoltaiický článek je zdroj elektrické energie a proto nás zajímá jeho napětí naprázdno, proud nakrátko a vnitřní odpor. Napětí naprázdno fotovoltaiického článku určuje polovodič, ze kterého je článek vyroben (např. u křemíkového článku to je 0,6 V). Velikost proudu nakrátko určuje velikost intenzity slunečního záření

dopadajícího na fotovoltaický článek. Nejčastěji článek charakterizujeme voltampérovou charakteristikou při různých intenzitách osvětlení. Nesmíme také opomenout účinnost článku, kdy při stejné intenzitě slunečního záření bude dvěma články o jiné intenzitě téct jiný proud. Také zde hraje roli vnitřní odpor fotovoltaického článku, díky němu dochází k nežádoucímu úbytku napětí. Nezanedbatelnou roli hraje teplota, kdy při vyšší teplotě je nižší napětí článku.

V praxi nás ovšem zajímá hlavně výkon článku, tedy součin napětí a proudu. Z tvaru voltampérové charakteristiky vyplývá, že při daných podmínkách (osvětlení, teplota) existuje právě jedna hodnota napětí a proudu, při níž nabývá výkon článku maximální hodnoty. Pokud je to možné, snažíme se provozovat fotovoltaické články v tomto optimálním pracovním bodu. Moderní měniče typu MPPT (Maximum Power Point Tracker) dokážou pracovat v režimu, kdy v každém okamžiku zatěžují fotovoltaický modul tak, aby jeho výkon byl maximální možný [5].

## **5.9 Solární fotovoltaické panely**

Využívání jednotlivých článků v praxi by nebylo příliš výhodné, proto se články montují a spojují do fotovoltaických panelů. V takovýchto panelech jsou články pospojovány do série, abychom dosáhli většího napětí, a také jsou kryty ochrannými rámy a skleněnými tabulemi pro lepší mechanickou odolnost před vlivy okolí.

Nejčastěji se na horní stranu panelu dává kalené sklo, které v kombinaci s pevným hliníkovým (duralovým) rámem zajistí dostatečnou pevnost a mechanickou odolnost. Vhodné je sklo se sníženým obsahem železa, které má lepší propustnost pro světlo v červené a blízké infračervené oblasti spektra. Moderní články mají antireflexní vrstvu, která snižuje ztrátu světla odrazem, a zvedne tak účinnost o několik procent. U monokrystalických článků tvoří často antireflexní vrstvu nitrid křemíku nanášený vakuovým napařováním. Snížením reflexe lze také dosáhnout vytvořením gradientu indexu lomu nebo vytvořením textury na povrchu. Jednou z možností je leptání bombardováním povrchu ionty ve vakuové komoře s použitím chloru nebo směsi hexafluoridu síry a kyslíku [5].

U tenkovrstvých solárních článků, kde se požaduje, aby byly ohebné, nelze sklo použít, a využívají se tedy plastové folie nebo nerezová ocel. Výsledná sestava někdy obsahuje dost vrstev, které plní různé funkce. Důležité je, aby bylo dokonale zamezeno vnikání vlhkosti k PN přechodu fotovoltaického článku. Flexibilní tenkovrstvé moduly se často přichycují lepením na podklad.

## **5.10 Možnosti zvýšení účinnosti fotovoltaických panelů**

Protože fotovoltaické panely stojí nemalé peníze, je naším cílem co nejkratší doba návratnosti pořizovacích nákladů. Na to má také vliv účinnost solárních panelů, proto je důležité, aby byla co nejvyšší.

## 5.11 Antireflexní vrstvy a textura povrchu

Jednou z možností je pochopitelně použití účinnějších fotovoltaických článků, nicméně zvýšení účinnosti se dá dosáhnout i zvýšením intenzity záření, které na fotovoltaický článek dopadne a je jím pohlceno. Materiál fotovoltaických článků má poměrně velký index lomu, dochází tudíž k odrazu části dopadajícího slunečního záření (zvláště když dopadá pod malým úhlem). Použitím dokonalejší antireflexní vrstvy lze dále zvýšit účinnost. Vytvořením jehlanovité struktury na přední straně se usnadňuje vstup fotonů do struktury článku, a naopak se díky totální reflexi znesnadňuje výstup nezachycených fotonů odražených od zadní strany článku směrem ven [5].

## 5.12 Průhledné kontakty

Sběrné kontakty odvádějící elektrický proud z vrchní vrstvy zastíňují svojí (byť minimální plochou) část fotovoltaických článků a tím snižují jejich účinnost. Využitím průhledných vodivých materiálů (např. oxid cínu) tento problém odstraníme. U kontaktů na spodní straně tento problém pochopitelně není.

## 5.13 Oboustranné panely

Elegantní možností, jak zvýšit výrazně množství záření dopadajícího na p-n přechod fotovoltaického článku, je použít speciální oboustranné fotovoltaické panely a nechat světlo dopadat z obou stran. Pokud je panel namontován například na bílé nebo stříbrné střeše, je množství záření dopadajícího ze zadní strany významné. Uvádí se zvýšení produkce až o 30 %. Takovéto panely se dobře uplatní také ve spojení se zrcadlovým koncentrátorem a stojanem umožňujícím natáčení za sluncem [5].

## 5.14 Natáčení panelů za sluncem

Významné zvýšení denní účinnosti panelů lze také dosáhnout jejich instalací na pohyblivou konstrukci, která sleduje pohyb slunce po obloze a panely tak mají po celý den správnou orientaci vůči slunci.

U malých systémů, s nimiž se v praxi setkáváme nejčastěji, se používá automatické natáčení kolem jedné osy. Umožňuje sledovat denní pohyb slunce po obloze. Změna výšky slunce nad obzorem v průběhu roku se několikrát ročně nastaví ručně. Vlastní sledování pohybu slunce se děje zpravidla pomocí dvojice čidel, jejichž signál je v rovnováze jen tehdy, když na obě čidla dopadá sluneční záření stejně [5].

U velkých systémů je obvyklé, že zařízení umožňuje automatické natáčení fotovoltaických panelů podle dvou os. Zpravidla je systém řízen počítačem a nastavení modulů do polohy kolmé ke slunci je založeno na tom, že systém má v paměti uloženu (nebo ji počítá) pozici slunce v každém okamžiku [5].

## 5.15 Koncentrátory

Koncentrátor je zařízení, které soustředí sluneční záření z velké plochy do malého prostoru fotovoltaického článku. Na článek tedy dopadá větší intenzita slunečního svitu a je tak schopen vyrobit více elektrické energie. Fotovoltaické články obvykle při vyšším světelném toku vykazují vyšší účinnost a proto je i výhodné použití dražších účinnějších typů článků. Další výhodou koncentrátorů je jejich nízká pořizovací cena.

Koncentrátorů použitelných (alespoň teoreticky) pro fotovoltaické moduly je celá řada a zpravidla se rozdělují podle toho, jaké optické prvky ke koncentraci využívají.

Koncentrátory zrcadlové:

- s rovinným zrcadlem,
- s parabolickým zrcadlem,
  - koncentrátory čočkové:
    - běžné spojné čočky,
    - Fresnelovy čočky,
  - koncentrátory založené na jiných principech (např. dielektrické nebo fluorescenční) [5].

Koncentrátory soustřeďující záření ze směru dvou prostorových os (v ideálním případě do bodového ohniska) se nazývají 3D koncentrátory. Ty, které soustřeďují záření do ohniskové přímky, se popisují jako 2D koncentrátory. Použití koncentrátorů s sebou nese i některé nevýhody, což je také důvod, proč se s koncentrátory málokdy v praxi setkáme [5].

## 6 SOLÁRNÍ TEPELNÉ SOUSTAVY

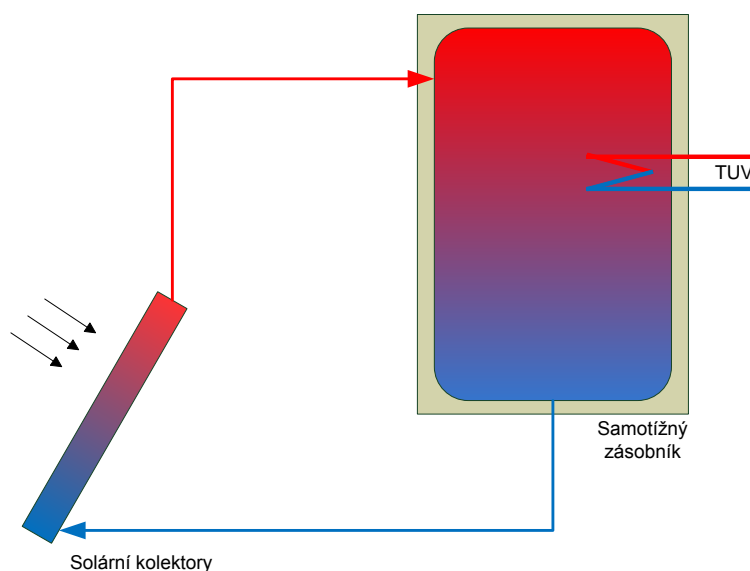
Solární tepelná soustava je soubor technických zařízení (solárního kolektoru, zásobníku, čerpadla atd.) sloužících k ohřevu vody, vzduchu nebo jiného média ze Slunce. Jak popíšeme, dále existuje a využívá se několik variant solárních tepelných soustav.

### 6.1 Rozdělení solárních systémů

Rozdělovat solární systémů můžeme několika způsoby. Jedním z nich je rozdělení podle plochy kolektorů.

Jako maloplošné je možné označit soustavy do  $20 \text{ m}^2$ , které vzhledem ke svému výkonu zpravidla ještě nevyžadují externí deskový výměník tepla a k přenesení výkonu kolektorového pole postačuje trubkový výměník uvnitř zásobníku. Rozdělení podle plochy je však nejednotné, často se jako velkoplošné soustavy označují i soustavy s více než  $50 \text{ m}^2$  kolektorové plochy. U velkoplošných solárních soustav nad  $200 \text{ m}^2$  může být již obtížné běžnými prostředky zvládnout stagnační stav – stav bez odběru tepla z kolektorů – a je třeba volit speciální opatření (nucené chlazení) [1].

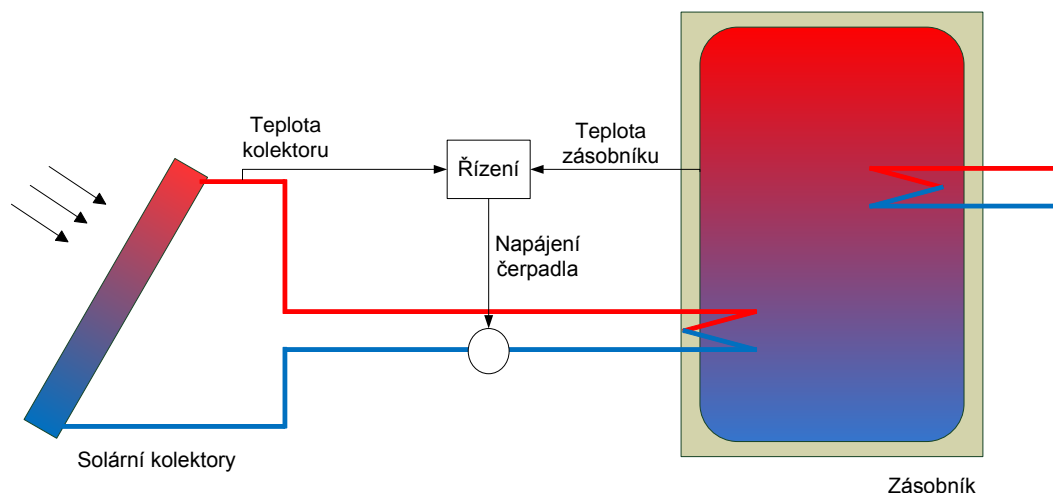
#### 6.1.1 Samotížný solární systém pro ohřev TUV



Obr. 6.1: Samotížný solární systém

Mezi nejjednodušší solární systémy řadíme samotížný solární systém (obr. 6.1). Tento systém pracuje na gravitačním principu, kdy lehčí teplá voda stoupá vzhůru a těžší studená voda klesá dolů. Zásobník musí být umístěn nad solárním kolektorem a v místech, kde nedojde k jeho zamrznutí. Jelikož je systém zcela nezávislý na elektrické energii, je vhodný pro použití na chatě či chalupě bez elektřiny.

### 6.1.2 Hnaný solární systém pro ohřev TUV – nepřímý ohřev



Obr. 6.2: Hnaný solární systém pro ohřev TUV – nepřímý ohřev

Jedná se o základní aplikaci solárního systému s čerpadlem. Regulátor porovnává teplotu média v kolektoru a v zásobníku. V případě, že je teplota v kolektoru vyšší o nastavenou diferenci, regulátor spustí čerpadlo. Při srovnání teplot se čerpadlo zastaví. Zásobník typu OKS (OVS) má dva měděné výměníky (registry). Ve spodním je nemrznoucí kapalina, v druhém protéká užitková voda z vodovodního řádu. Ta je ohřívána akumulací vodou uvnitř zásobníku. Jedná se tedy o nepřímý ohřev TUV. Nádoba zásobníku je z černé oceli a je naplněna jednorázově akumulací vodou. Tato voda je bez kyslíku, proto zde nevznikají podmínky pro korozi. Pro dohřev je možné využít elektrické topné těleso umístěné přímo v zásobníku, jiný zdroj tepla (plynový nebo elektrický kotel, krbovou teplovodní vložku atd.) nebo může sloužit celý systém pro předehřev před stávajícím ohřevem (elektrický bojler, plynový kotel atd.). Výhodou nepřímého ohřevu je čistá voda bez usazenin a kalů, dlouhá životnost zásobníku a také se v systému nemnoží bakterie [6].

### 6.1.3 Hnaný solární systém pro ohřev TUV – přímý ohřev

Systém pracuje na stejném principu jako předešlý (se zásobníkem OKS). Rozdíl je pouze v použitém typu zásobníku. Samotná nádoba je smaltovaná a standardně obsahuje pouze jeden výměník (registr) pro připojení kolektorů. Voda z vodovodního řádu je přímo ohřívána v nádobě. Jedná se tedy o přímý ohřev. U tohoto typu zásobníku je možné usazování kalů a nečistot a případné množení bakterií. Zásobníky mají proti typu OKS výhodu v tom, že nedochází k dvojímu přestupu tepla. Výstupní voda je teplejší, protože nedochází ke ztrátě tepla na horním výměníku. Pro dohřev je možné využít elektrické topné těleso umístěné přímo v zásobníku nebo může sloužit celý systém pro předehřev před stávajícím ohřevem (elektrický bojler, plynový kotel atd.). V případě, že zásobník osadíme v horní části druhým výměníkem, může být tento výměník využit pro dohřev vody z externího zdroje (kotel, krbová vložka atd.) [6].

#### **6.1.4 Hnaný solární systém pro ohřev TUV a bazénu**

Jedná se o standardní zapojení systému pro ohřev TUV. Nejdříve dochází k ohřevu vody v zásobníku. Jakmile dosáhne teplota vody v zásobníku nastavené hodnoty, otevře se ventil a je ohřívána voda v bazénu přes bazénový výměník. Bazén je ohříván do té doby, než voda v zásobníku klesne pod nastavenou hodnotu a ventil se přepne pro ohřev zásobníku.

#### **6.1.5 Hnaný solární systém pro ohřev TUV a přitápění**

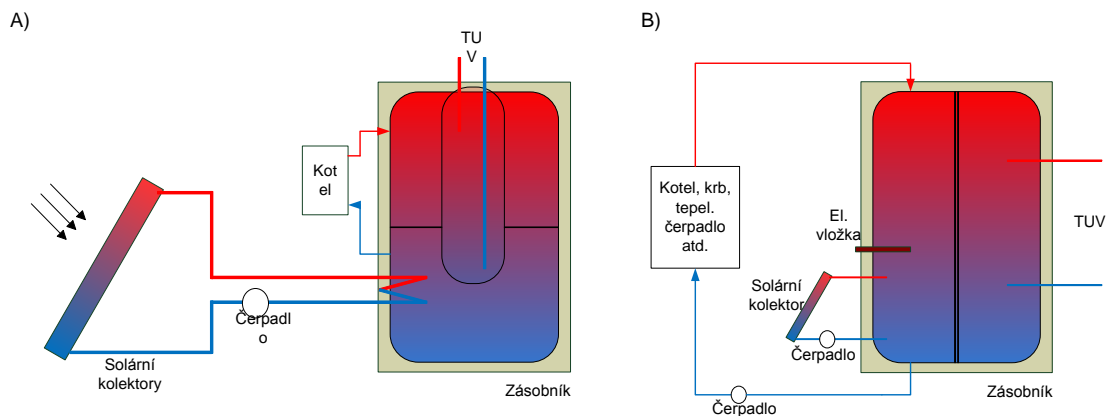
Akumulační zásobník OKS je zařazen do vratné větve topného okruhu. Vakuové trubicové kolektory ohřívají vodu v akumulární nádrži. Primární okruh je naplněn nemrznoucí kapalinou, která pomocí měděného výměníku ohřívá náplň akumulárního zásobníku. Elektronický regulátor R1 vyhodnocuje rozdíl teplot mezi teplotou média v kolektoru a teplotou vody v zásobníku a spíná čerpadlo (shodné u všech hnaných systémů). Druhý regulátor R2 vyhodnocuje teplotu vody v akumulárním zásobníku a porovnává ji s teplotou vratné větve topného okruhu. Pokud je teplota vody v zásobníku vyšší než teplota vratné topné vody, je teplejší voda ze zásobníku využívána pro topení.

V okamžiku, kdy se teploty vyrovnají, servoventil přepne topný systém do polohy, kdy vratná větev topení jde mimo zásobník (bypasse). Systém čeká na opětovný ohřev zásobníku solárním systémem [6].

Dalším řešením je využití soustavy se zásobníkem SISS, který má uvnitř integrovaný plovoucí zásobník pro ohřev TUV. Výhodou je, že k tepelné výměně nedochází průtočným způsobem přes měděný výměník. TUV je odebírána z menšího boileru (viz. obr. 6.3) ponořeného do většího zásobníku, kde je ohříván. Výhodou tohoto řešení je vyšší teplota TUV.

Konstrukční řešení zásobníku nazývané zkratkou PAST (předávací akumulární stanice tepla, viz obr. 6.3) umožňuje efektivně využít sluneční záření pro přitápění. Do tohoto zásobníku jsou připojeny veškeré tepelné zdroje a spotřebiče v domě. Teplo získané ze solárních kolektorů se ukládá do spodní části zásobníku, tím je zajištěn co nejefektivnější přenos tepla. Na straně vstupů je možné do zásobníku zapojit kotel, elektrické vytápění, krbovou vložku. Na výstup je možné napojit ohřev bazénové vody, ohřev TUV a také topný okruh. Zásobník je řešen tak, aby se tepelné zdroje co nejméně ovlivňovaly a to i při větším rozdílu teplot.





Obr. 6.3: a) zásobník typu SISS; b) zásobník typu PAST

## 6.2 Průtok solární soustavou

Podle velikosti průtoku teplotonosné kapaliny soustavou se navrhují solární soustavy:

- Soustava „high flow“ (s vysokým průtokem),  $50 - 75 \text{ l}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$
- Soustava „low flow“ (s nízkým průtokem),  $10 - 15 \text{ l}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$
- Soustava „matched-flow“ (s proměnným průtokem).

Soustavy s vysokým průtokem jsou běžné především u maloplošných soustav pro rodinné domy. Vlivem vysokého průtoku kolektorem dochází k ohřátí teplotonosné kapaliny o 6 až 10 K. Zásobník nevyužívá výrazného vrstvení teplot a je nabíjen postupně celý objem současně (pomalý nárůst teploty v celém zásobníku), nejčastěji trubkovým výměníkem v dolní části zásobníku [1].

Soustavy s nízkým průtokem jsou vhodné spíše pro velkoplošné soustavy. Při nízkém průtoku je teplotonosná kapalina v kolektorech ohřívána přibližně o 30 až 50 K a kapalina je tak využitelná již po jednom průchodu systémem.

Soustavy s proměnným průtokem se používají v kombinaci s pokročilou regulační strategií, která optimalizuje průtok solárními kolektory pro dosažení vyšší využitelnosti solárního tepla. Regulační strategie s proměnným průtokem je dnes již součástí i regulátorů maloplošných solárních soustav se dvěma solárními výměníky (horní, dolní). Otáčky oběhového čerpadla jsou řízeny tak, aby na výstupu z kolektoru byla dostatečně využitelná teplota („low-flow“ režim), např.  $60^\circ\text{C}$ , kterou je nabíjena horní část zásobníku tepla. Pokud soustava nedosahuje využitelné teploty, přechází soustava do „high-flow“ režimu a teplo je ukládáno do spodní části zásobníku [1].

## 6.3 Primární okruh

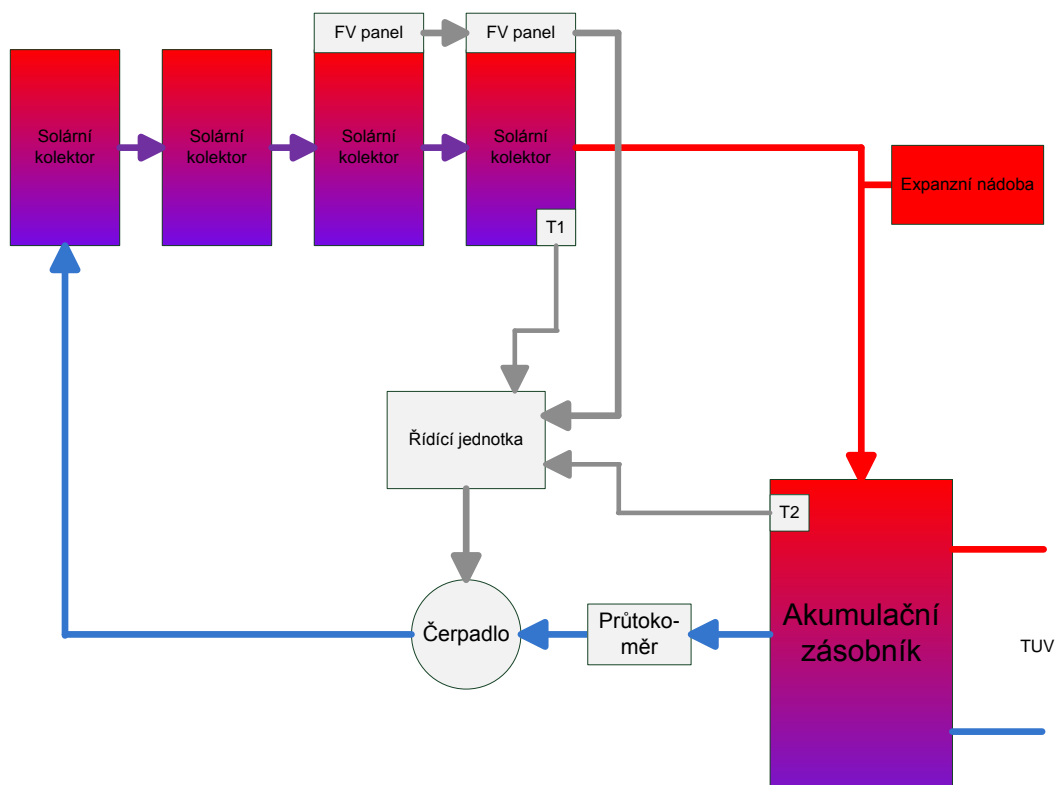
V praxi rozlišujeme dvě konstrukční provedení primárního okruhu solární kapalinové soustavy. Prvním z nich jsou tzv. soustavy uzavřené a druhým z nich soustavy vyprazdňovací (drain-back).

Nejčastěji používanými soustavami v našich podmínkách jsou soustavy uzavřené. Jsou stavěné pro celoroční provoz, a proto musí být napuštěny nemrznoucí teplotnosnou kapalinou v primárním okruhu, expanzní nádobou kompenzující teplotní roztažnost teplotnosné kapaliny, a pojistným ventilem. Ve stavu kdy kolektor nedodává teplo je oběhové čerpadlo zastaveno a teplotnosná kapalina je zahřívána. To způsobuje zvětšování jejího objemu a pohlcování kapaliny expanzní nádobou. Tento stav pokračuje až do doby, kdy podmínky v kolektoru (tlak a teplota) přesáhnou bod varu teplotnosné kapaliny. Jde o běžný jev, kdy přísun tepla ze slunce překročí jeho odběr a pojistný ventil by neměl zareagovat. Vede to však ke stárnutí teplotnosné kapaliny a její postupné degradaci.

Soustavy s vyprazdňováním, tzn. drain-back soustavy, pracují jako otevřené soustavy. V době mimo provoz jsou kolektory a potrubí primárního okruhu bez teplotnosné kapaliny a jsou vyplněny vzduchem. V případě ohřátí kolektorů na dostatečně využitelnou teplotu se zapíná oběhové čerpadlo a vytlačuje vodu do kolektorů (nutný vysoký výtlak oběhového čerpadla úměrný rozdílu výšek v solární soustavě). Po zaplavení primárního okruhu se čerpadlo přepne na nižší otáčky a hradí pouze tlakové ztráty okruhu. Při poklesu rozdílu teplot mezi kolektory a zásobníkem pod nastavenou hodnotu se čerpadlo vypíná a kapalina stéká po sběrné dráze [1].

## 7 POPIS MĚŘENÉHO SYSTÉMU

Měřený systém je namontován na jednom z domů v Židlochovicích poblíž Brna. Instalace slouží výhradně k ohřevu TUV. Systém (řídící jednotka a oběhové čerpadlo) je napájen ze dvou malých fotovoltaických panelů a celá sestava je tak energeticky zcela autonomní. Blokové schéma měřeného systému vidíme na obr. 11. V kapitolách dále si tento systém popíšeme podrobněji.



Obr. 7.1: Blokové schéma měřeného systému

### 7.1 Solární kolektory

Kolektory jsou instalovány na střeše domu, jejich sklon je  $28^\circ$  a odklon od jihu  $15^\circ$  na východ. Pro dostatečnou potřebu k ohřívání TUV jsou sériově nainstalovány celkem čtyři vakuové trubkové kolektory VV8, dva kolektory bez reflektoru VV8-A a dva kolektory bez reflektoru s fotovoltaikou VV8-A-F, vše od firmy Vermos s.r.o. Každý kolektor má rozměry  $1965 \times 900 \times 150$  mm (DxŠxT) - bez započítání FV článků. Celková absorpční plocha se rovná  $5,8 \text{ m}^2$  a maximální energetický zisk může, obecně za ideálních podmínek dosahovat až  $3244 \text{ kWh/rok}$  [7].

## 7.2 Akumulační zásobník

Akumulační stacionární zásobník 0,6 MPa a boční přírubou - bez topného tělesa typu OKC 250 NTRR/E od firmy DZ Dražice s.r.o. Důležitým parametrem je objem zásobníku činící zhruba 250 l. K zásobníku je připojen dohřívací zdroj, který do systému přivádí potřebnou energii v případě, že sluneční aktivita není dostatečně vysoká k ohřevu teplotnosného média a následně vody v zásobníku. Výkon akumulčního zásobníku dosahuje až 24 kW pro spodní i horní výměník, dohromady tedy až 48 kW [7].

## 7.3 Oběhové čerpadlo

Instalované bronzové oběhové čerpadlo Ecocirc D5 Vario typu D5-38/700 je konstruováno s kapalinou obtékaným rotorem s permanentním buzením a 13 autostavitelným ložiskem, bezhřídelovým elektronicky komutovaným sférickým motorem, plynulým nastavením výkonu, výtlačkem 0 - 4 m a průtokem 0 - 1,7 m<sup>3</sup>/hod [8].

Napájení čerpadla vede z řídicí jednotky. Pracovní napětí čerpadla je od 8 V do 24 V. Nastane-li případ, kdy fotovoltaické panely nedodávají minimum energie, řídicí jednotka (a též čerpadlo) nepracuje.

Důležitá součást systému je také průtokoměr, který nám pouze indikuje běh čerpadla. Vlastní průtok systémem je řízen velikostí napětí na čerpadle.

## 7.4 Řídicí jednotka

Řídicí jednotku od firmy Vermos s.r.o. (typ AEV 0203) napájí dva malé fotovoltaické panely.

Hlavní účelem jednotky je plynulá regulace a automatický chod systému. Její funkce spočívá ve vyhodnocování teplot teplotnosného média v kolektoru  $T_K$  a vody v akumulčním zásobníku  $T_Z$ . Na základě rozdílu  $T_K - T_Z$  pak určuje chod systému. Teplotní diferenci lze nastavit na 5 - 25 °C, to znamená, že při této diferenci se zapíná čerpadlo. Přitom při poklesu rozdílu teplot na 2 °C se čerpadlo zastaví (tato hodnota je pevně nastavena).

Havarijní stav nastane tehdy, pokud teplotnosné médium překročí hodnotu 100 °C a to bez ohledu na nastavený diferenciál. V takovémto případě se automaticky sepne čerpadlo a na jednotce svítí dioda signalizace havárie. Situace se opět navrátí k normálu při poklesu média pod 95 °C.

Jednotku také umožňuje spínání a vypínání čerpadla ručně (využití především při potřebě servisu systému) [7].

Napájení jednotky je zcela závislé na přísunu energie z fotovoltaických panelů. Žádný záložní zdroj napětí zde není. V případě malého výkonu fotovoltaických panelů (špatné počasí, šero) se stává, že řídicí jednotka a čerpadlo nemají dostatek energie pro svůj chod. To však ve většině případů nevádí, protože bez slunečního svitu nepracují ani fototermické kolektory. Mohou však nastat mezní případy, kdy fototermické panely by

již mohly dodávat teplo do zásobníku, avšak fotovoltaické panely nevyrobí dostatek energie, aby dokázaly roztočit čerpadlo.

## 7.5 Fotovoltaické články

Systém obsahuje také dva malé fotovoltaické panely, každý o špičkovém výkonu 11 W, zapojené do série. Tyto panely slouží k napájení řídicí jednotky a oběhového čerpadla.

## 7.6 Ostatní části systému

V systému se ještě nacházejí tyto části:

- **Expanzní nádoba** – kompenzuje tepelnou roztažnost teplotnosné kapaliny,
- **Průtokoměr** – sleduje průtok teplotnosné kapaliny soustavou (resp. indukce chod čerpadla),
- **Čidlo teploty v kolektoru** – měří teplotu kapaliny vycházející z kolektoru,
- **Čidlo teploty zásobníku** – měří nejvyšší teplotu kapaliny v zásobníku,
- **Čidlo přehřátí vody** – měří teplotu vody v zásobníku v blízkosti dohřívacího elektrického tělesa, v případě překročení maximální teploty spíná ochranný ventil,
- **Ochranný ventil** – odpouští přehřátou vodu ze zásobníku na základě pokynu čidla přehřátí vody,
- **Dohřívací zdroj (dohřívací elektrické těleso)** – jedná se o poměrně důležitou součást systému. Dohřívací elektrické těleso je napájeno z elektrické sítě a ohřívá vodu v době, kdy kolektory nepracují.

## 8 POPIS MĚŘICÍ METODY

Měřicí systém bude postaven na základě minipočítače Raspberry Pi. Tento počítač byl vybrán z důvodu dlouhotrvajícího měření, kdy je potřeba sesbírat a vyhodnotit velké množství dat. Další výhodou je nízká cena (Raspberry Pi se prodává okolo 30 liber) a poměrně široká škála dalších připojitelných modulů.

### 8.1 Hlavní komponenty měřicího systému

**Raspberry Pi** – (dále jen RPi) jedná se o miniaturní počítač s procesorem Broadcom BCM2835 pracující na frekvenci 700 MHz a operační paměti o velikosti 256 MB. Mezi konektory bychom našli dva USB porty, HDMI výstup, konektor LAN, kompozitní a audio výstup a GPIO port (UART, I2C, SPI). Jako paměť pro operační systém Linux slouží SD karta. K napájení celého zařízení stačí zdroj o výkonu 3 W.

**ADC Pi V2.2** – jedná se o osmi kanálový 17-bitový A/D převodník určený pro Raspberry Pi.

**Teplotní čidlo DS18B20** – číslicové teplotní čidlo v provedení pro rozsah teplot od -55 °C do 125 °C.

**USB Wi-Fi modul WIPI DONGLE** – USB modul pro připojení se k místní wi-fi síti pro získání reálného času a on-line přístupu k naměřeným datům.

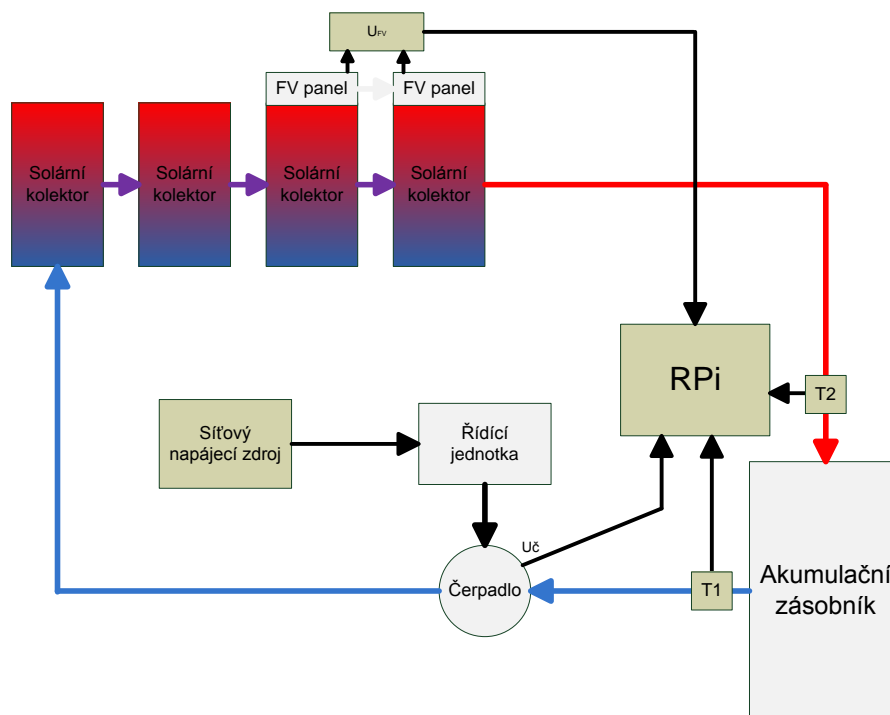
### 8.2 Zapojení měření

Hlavní částí měřicí sestavy je minipočítač RPi. Na obr. 8.1 je RPi se zapojeným A/D převodníkem a Wi-Fi modulem. Dále jsou k RPi připojena dvě teplotní čidla pro měření vstupní a výstupní teploty kolektorů.



Obr. 8.1: RPi s A/D převodníkem

Bude také nutností měřit napětí na fotovoltaických panelech, které je připojeno přes dělič na první kanál A/D převodníku. Aby bylo možné provést měření, je solární systém (resp. řídicí jednotka a oběhové čerpadlo) napájeno z externího síťového zdroje. Principiální schéma znázorňující zapojení měření je na obr 8.2.



Obr. 8.2: Principiální zapojení měření

### 8.3 Program a jeho funkce

Po zapnutí RPi automaticky pustí měřicí program a není tedy nutné po případném výpadku napájení či restartu zařízení opět cokoliv nastavovat. Program pracuje v časovém rozmezí od 6:00 do 21:00 a každých deset minut zaznamenává měřené veličiny. Po každém měření program také vygeneruje HTML tabulku, do které vypíše právě změřené hodnoty. Pro on-line přístup k naměřeným hodnotám je na RPi nainstalován web server. Celý kód je zobrazen v příloze.

### 8.4 Přístup k datům

Naměřená data minipočítač RPi ukládá na systémovou SD kartu v souborovém formátu .csv. Po přihlášení do systému je tedy možné s tímto souborem pracovat. Protože je RPi stále připojeno k internetu, je možný také on-line přístup k naměřeným hodnotám. Stačí tedy do internetového prohlížeče zadat veřejnou IP adresu na, které je RPi umístěné. Ukázka výpisu měřených dat je na obr. 8.3.

Date and time ▲	Vyst zasobnik	Vst zasobnik	U <sub>cerp</sub>	U <sub>fv</sub>
2014-05-27-20:50:02	32.437	41.187	0.001	0.743
2014-05-27-20:40:02	33.000	41.312	0.001	1.282
2014-05-27-20:30:02	33.625	41.437	0.001	1.682
2014-05-27-20:20:03	33.875	41.562	0.001	1.818
2014-05-27-20:10:02	34.312	41.750	0.001	2.003
2014-05-27-20:00:02	34.312	41.937	0.001	2.106
2014-05-27-19:50:02	34.562	42.062	0.001	2.175
2014-05-27-19:40:02	34.875	42.187	0.001	2.161

Obr. 8.3: Ukázka výpisu naměřených dat

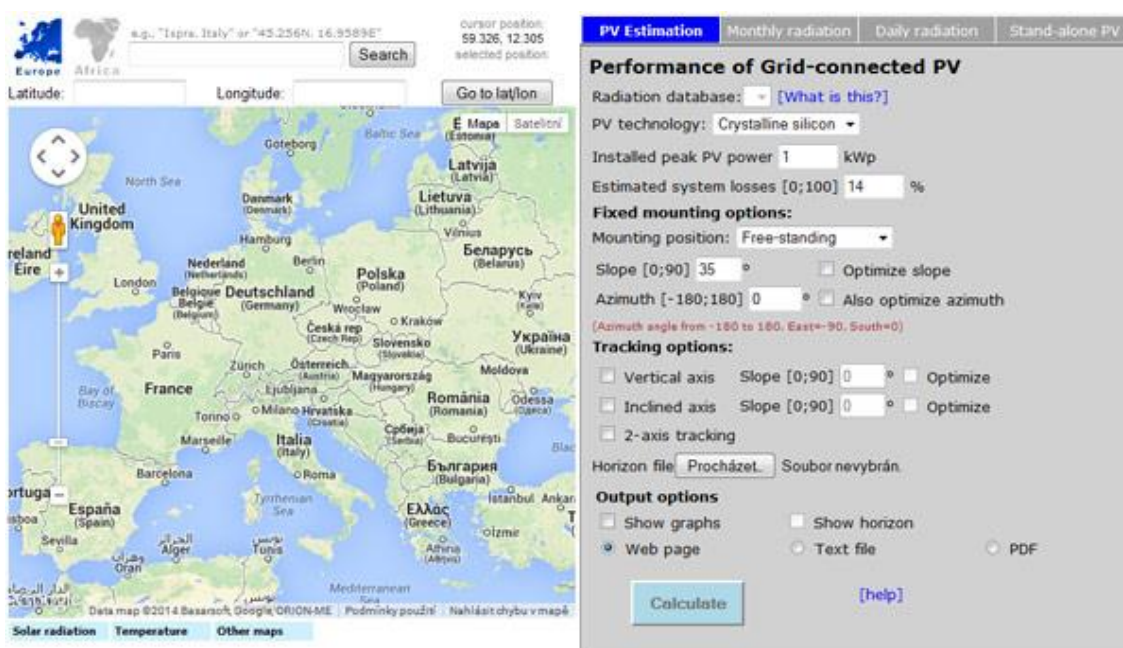
Jak je patrné, měřená data se primárně zapisují chronologicky. Po kliknutí myši na jednotlivé názvy sloupců je možné data seřadit sestupně či vzestupně, vždy podle hodnot v daném sloupci. V prvním sloupci je zaznamenáno datum a čas měření. Sloupce  $V_{\text{yst zasobnik}}$  a  $V_{\text{st zasobnik}}$  obsahují hodnoty z teplotních čidel neboli teplotu na výstupu na vstupu do tepelného zásobníku. Ve sloupci  $U_{\text{cerp}}$  jsou hodnoty napětí na FV panelech, které je však ještě nutné přepočítat na reálné hodnoty napětí. Pro případ potřeby je zde také sloupec  $U_{\text{fv}}$ , který také zaznamenává napětí. Zůstal však nezapojen.



## 9 VÝPOČET TEORETICKÝCH HODNOT TEPELNÉHO VÝKONU

### 9.1 Vytvoření modelového dne

Abychom byli schopni zhodnotit naměřené hodnoty, byl za tímto účelem vytvořen modelový den z teoretických hodnot dostupných na internetu. K tomuto účelu dobře posloužil Photovoltaic Geographical Information System (obr. 9.1.)



Obr. 9.1: Ukázka webu Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [9]

Jedná se o veřejně dostupnou aplikaci vytvořenou výzkumným centrem Evropské komise za účelem poskytnutí modelu pro výpočet produkce elektrické energie fotovoltaických systémů kdekoliv v Evropě. Tato aplikace lze také využít k získání klimatických údajů jako je například dávka slunečního záření pro danou lokalitu a to i s ohledem na vlastnosti okolního terénu.

Do systému byla zadána poloha obce Židlochovice, orientace měřeného systému (horizontální sklon  $28^\circ$  a odklon od jihu  $15^\circ$ ) a zvolena možnost zobrazení denních hodnot pro měsíc květen. Na obr. 9.2 vidíme část výstupních hodnot. Hodnoty  $G$  a  $G_d$  jsou hodnoty globálního záření na pevné rovině a difuzního záření na pevné rovině (obojí v  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Pro výpočet modelového dne byly nejvhodnější hodnoty  $G_c$  (globální záření na pevné rovině při jasné obloze, také v  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) a průměrné venkovní teploty  $T_d$ . Pro lepší orientaci při zpracovávání dat byla provedena drobná korekce času. PVGIS

uvádí hodnoty vždy po patnácti minutách, proto byl u každé hodnoty čas posunut o osm minut dopředu, tak aby odpovídal celým hodinám a zpracovány byly jen hodnoty v časovém rozmezí od 6:00 do 19:00.

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Inclination of plane: 28 deg.  
Orientation (azimuth) of plane: 15 deg.

Time	$G$	$G_d$	$G_e$	$T_d$
04:52	22	22	16	-
05:07	37	36	26	-
05:22	51	51	37	-
05:37	65	64	47	-
05:52	79	78	57	-
06:07	92	91	66	11.7
06:22	103	94	74	12.1
06:37	130	107	112	12.5
06:52	159	120	154	12.8
07:07	189	131	200	13.2

Obr. 9.2: Výstupní hodnoty ze PVGIS [9]

Takto získané hodnoty byly doplněny průměrnými hodnotami rozdílu teplot na vstupu a výstupu kolektorů  $\Delta T$ , které byly získány zprůměrováním hodnot z naměřených dat [7]. Poté byly provedeny výpočty výkonu podle vztahu 9.1 [7].

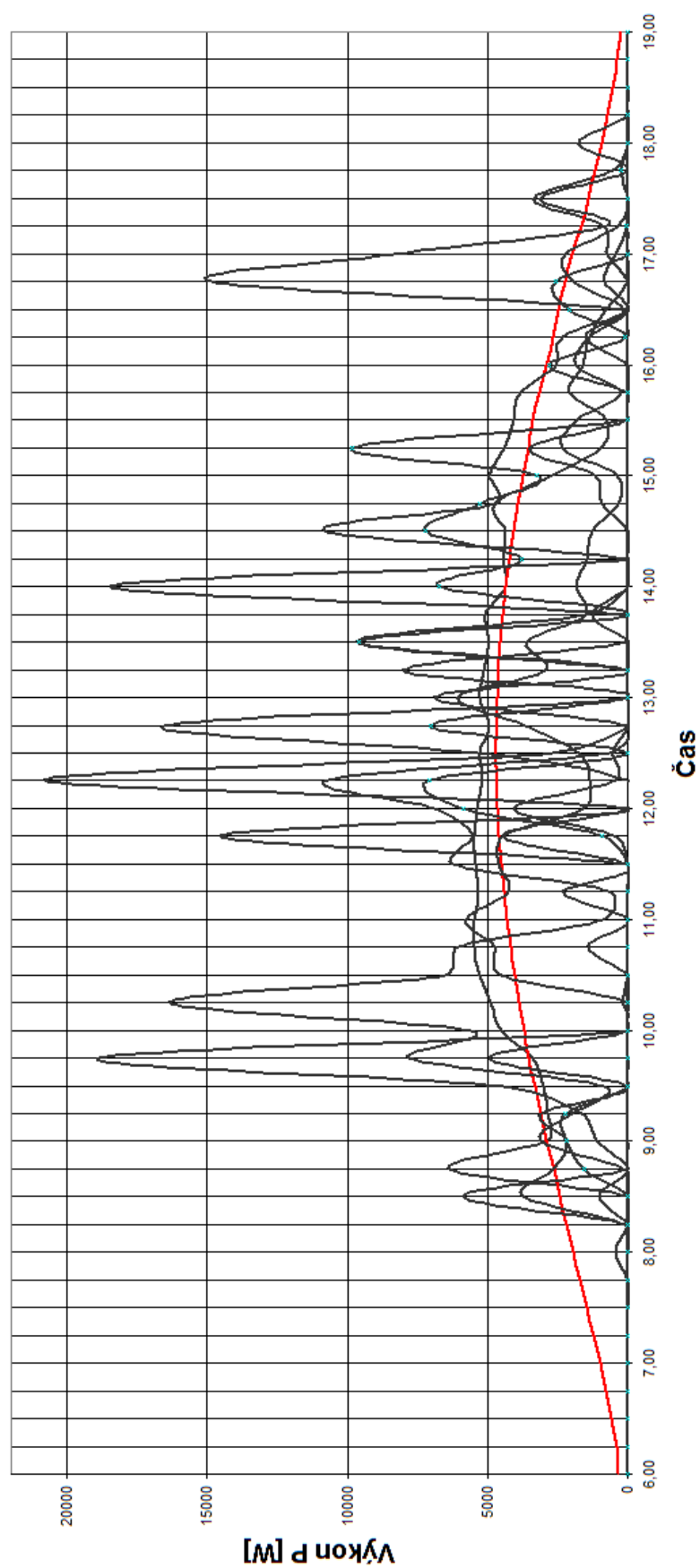
$$P = F \cdot \rho \cdot c \cdot (\Delta T) \quad (9.1)$$

Kde je:

$P$	výkon [ W ]
$F$	průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$\rho$	hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$c$	měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\Delta T$	rozdíl teplot na vstupu a výstupu kolektorů [K].

Hodnoty průtoku byly vypočteny pomocí polynomů získaných interpolací zátěžové křivky oběhového čerpadla [7]. K výpočtům byl použit program Matlab a veškeré skripty potřebné k výpočtům jsou obsaženy v příloze. Z takto vypočtených hodnot byla sestavena křivka výkonu v závislosti na denní době a následně byla tato křivka zobrazena (červeně) ve společném grafu 9.1 hodnotami denních výkonů (černě) [7].

Graf závislosti výkonu na denní době



Obr.: 9.3 Závislost tepelného výkonu na denní době

## 9.2 Teoretický výpočet denního výkonu a ztrát

Měřené hodnoty denních výkonů jsou v přibližném časovém rozmezí 8:00 až 18:00. Červená křivka je však v časovém rozsahu od 6:00 do 19:00. K určení velikosti předpokládaných ztrát bylo tedy nutné vyčíslit velikost energie v době, kdy už systém reálně nepracuje (tj. od 6:00 do 8:00 a od 18:00 do 19:00). To bylo provedeno jako výpočet velikosti plochy pod křivkou v daném časovém úseku (vztahy 9.2 a 9.3). Pro zjednodušení výpočtu je část křivky (6:00 – 6:15) považována jako konstantní a nárůst (resp. pokles) je považován jako lineární.

**Výpočet ztrátového výkonu systému  $P_{ztr1}$  v rozmezí 6:00 – 8:15:**

$$P_{ztr1} \approx \int_0^{0,25} 345 dx + \int_{0,25}^{2,25} 838x dx = 86,25 + 2095 = 2181,25 Wh \quad (9.2)$$

**Výpočet ztrátového výkonu systému  $P_{ztr2}$  v rozmezí 18:15 – 19:00:**

$$P_{ztr2} \approx \int_{0,25}^1 745x dx = 349,22 Wh \quad (9.3)$$

Po sečtení obou hodnot je tedy velikost denních ztrát rovna přibližně 2,5 kWh. Následně byl z modelových hodnot také spočítán teoretický denní výkon systému (vztah 9.4). Teoretický denní výkon je 35,5 kWh. Tato hodnota je poněkud větší než reálně naměřené hodnoty, protože v tomto výpočtu nejsou zohledněny tepelné ztráty systému a odběry energie ze systému během jednotlivých měření.

**Výpočet celkového výkonu  $P_m$  systému za jeden modelový den:**

$$\begin{aligned} P_m &\approx \int_0^{0,25} 345 dx + \int_{0,25}^5 838x dx + \int_0^{1,5} 229x + 4311 dx + \int_0^{1,5} 184x + 4346 dx + \\ &+ \int_0^5 824x + 226 dx = \\ &= 86,25 + 10449 + 6724 + 6726 + 11430 = 35415,25 Wh \approx 35,5 kWh \end{aligned} \quad (9.4)$$

Je-li více slunečných dní po sobě a ze systému není odebírána žádná energie (nebo jen malé množství), systém už není schopen další energii pojmout. Poté tedy bude denní výkon systému malý. Může také nastat opačná situace, kdy během dne bude ze systému energie odebírána. Poté denní výkon může být větší, než je maximální výkon systému.

## 9.3 Výpočet denního ztrátového výkonu

Pro výpočet ztrátového výkonu z denních měření bude využit zpětný výpočet intenzity záření z napětí naměřeného na fotovoltaických panelech a následný výpočet maximální možné získané energie z tohoto záření. Následně bude podle velikosti naměřeného napětí na fotovoltaických panelech vyhodnoceno, kdy systém mohl pracovat a kdy pracovat nemohl a z tohoto bude vyčíslen ztrátový výkon.

Výpočet intenzity záření z naměřeného napětí na fotovoltaických panelech vychází ze vztahu 9.5 [7], z kterého je vyjádřena intenzita záření  $E$ .

$$P = E \cdot S_{fv} \cdot \eta_{fv} [W; W \cdot m^{-2}, m^2, -] \quad (9.5)$$

Plocha  $S_{fv}$  a účinnost  $\eta_{fv}$  jsou konstanty dány parametry použitých fotovoltaických panelů a výkon  $P$  byl vyjádřen z naměřených hodnot napětí a zatěžovací charakteristiky fotovoltaických panelů. Takto získané hodnoty intenzity  $E$  byly dosazeny do vztahu 9.6 [1].

$$Q = E \cdot S_{ft} \cdot \eta_{ft} [W; W \cdot m^{-2}, m^2, -] \quad (9.6.)$$

Plocha  $S_{ft}$  je součtem jednotlivých ploch fototermických kolektorů. Účinnost  $\eta_{ft}$  nabývá různých hodnot v závislosti na typu použitého fototermického kolektoru. V tomto případě se jedná o hodnoty 0,75 pro kolektory bez absorberu a 0,82 pro kolektory s absorberem. Výkon  $Q$  tedy zahrnuje pouze maximální možný výkon pro jeden konkrétní fototermický kolektor. Abychom byli schopni vyčíslit maximální možný výkon celé soustavy  $Q_c$  je za potřeby vztahu (9.7).

$$Q_c = 2 \cdot (Q_s + Q_b) \quad (9.7)$$

Maximální možný výkon soustavy je tedy roven dvojnásobku součtu výkonu panelu s absorberem  $Q_s$  a bez absorberu  $Q_b$  (v soustavě jsou oba typy kolektorů dvakrát). Pro zpřesnění výpočtu výkonů bylo provedeno experimentální stanovení účinnosti dle vztahu (9.8) [1] (resp. zpřesnění hodnoty účinnosti).

$$\eta_k = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{t_m - t_e}{E} - a_2 \cdot \frac{(t_m - t_e)^2}{E} \quad (9.8)$$

$\eta_0$  je účinnost solárního kolektoru při nulovém teplotním spádu mezi střední teplotou teplotnosné kapaliny  $t_m$  a okolím  $t_e$  (nulové tepelné ztráty), zjednodušeně označována jako optická účinnost [1]. V tomto případě se tedy jedná o již zmíněné hodnoty 0,75 a 0,82. Součinitel  $a_1$  je lineární součinitel tepelné ztráty kolektoru udávaný výrobcem. Pro kolektory bez absorberu je  $a_1 = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  a pro kolektory s absorberem je  $a_1 = 1,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Součinitel  $a_2$  je kvadratický součinitel tepelné ztráty kolektoru, který výrobce udává o velikosti  $a_2 = 0,008 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$  pro kolektory bez absorberu a  $a_2 = 0,0046 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$  pro kolektory s absorberem. Podíl  $(t_m - t_e)$  a  $E$  se nazývá střední redukovaný teplotní spád mezi kapalinou a okolím  $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ , kde teplota  $t_e$  je teplota okolí a  $t_m$  je střední teplota teplotnosné kapaliny stanovená jako průměr ze vstupní a výstupní teploty tepelného zásobníku. Z výkonů celé soustavy  $Q_c$

poté vypočteme denní výkon případně denní ztráty.

## 9.4 Ukázka výpočtu denních ztrát

Prvním krokem při výpočtu denních ztrát bylo zpracování naměřených dat, jak je vidět v tab. 9.1.

Datum	$T_{out}$ [°C]	$T_{in}$ [°C]	$U_{\check{c}}$ [V]	$U_{fv}$ [V]	$U_{\check{c}_{real}}$ [V]	$U_{fv_{real}}$ [V]	$_{dT}$ [°C]
2014-05-19-06:00:03	20,75	25,13	0,00	1,95	0,00	5,86	4,38
2014-05-19-06:10:02	20,81	25,13	0,00	2,10	0,00	6,29	4,31
2014-05-19-06:20:02	20,81	25,06	0,00	1,32	0,00	3,97	4,25
2014-05-19-06:30:02	20,75	24,63	0,00	1,41	0,00	4,24	3,88
2014-05-19-06:40:02	20,31	23,81	0,00	1,76	0,00	5,29	3,50
2014-05-19-06:50:02	20,13	23,38	0,00	2,24	0,00	6,71	3,25
2014-05-19-07:00:02	20,19	23,06	0,00	2,31	0,00	6,94	2,88
2014-05-19-07:10:02	20,19	22,94	0,00	2,50	0,00	7,51	2,75
2014-05-19-07:20:02	20,13	22,88	0,00	2,80	0,00	8,40	2,75
2014-05-19-07:30:02	20,25	22,88	0,00	2,79	0,00	8,36	2,63
2014-05-19-07:40:02	20,25	22,81	2,52	2,63	7,55	7,90	2,56
2014-05-19-07:50:02	21,25	21,69	0,00	2,76	0,00	8,27	0,44
2014-05-19-08:00:02	21,06	21,88	0,00	2,67	0,00	8,01	0,81
2014-05-19-08:10:02	20,81	22,00	0,00	2,86	0,00	8,59	1,19
2014-05-19-08:20:02	21,88	24,19	2,56	2,69	7,69	8,07	2,31
2014-05-19-08:30:02	23,13	25,81	2,53	2,65	7,59	7,96	2,69
2014-05-19-08:40:02	24,00	26,38	2,56	2,69	7,67	8,06	2,38

Tab. 9.1: Ukázka naměřených hodnot

Hodnoty  $T_{out}$  a  $T_{in}$  jsou hodnoty teploty naměřené na výstupu a vstupu do zásobníku.  $U_{\check{c}}$  je hodnota napětí na čerpadle naměřená A/D převodníkem a  $U_{\check{c}_{real}}$  je přepočet na skutečnou hodnotu napětí.  $U_{fv}$  je napětí naměřené A/D převodníkem na fotovoltaických panelech a  $U_{fv_{real}}$  je opět jeho přepočet na skutečnou hodnotu. Hodnoty ve sloupci  $_{dT}$  jsou rozdílem  $T_{in}$  a  $T_{out}$ . Dále bylo nutné stanovit případy, kdy by při reálném provozu systému docházelo ke ztrátám (resp. tepelnému výkonu, který by systém nebyl schopen zachytit). K tomuto dochází při hodnotách  $U_{fv}$  menších jak 10 V, neboť jak bylo experimentálně zjištěno, nejsou fotovoltaické panely schopny při takto nízkém napětí roztočit oběhové čerpadlo a při běhu čerpadla napájeného externím zdrojem (tzn. nenulové hodnoty napětí  $U_{\check{c}}$ ). Pro přehlednost byly tyto řádky zvýrazněny červenou barvou.

V dalším kroku následoval zpětný výpočet intenzity záření  $E$  podle vztahu 9.5 a

výpočet tepelného výkonu  $Q_c$  podle vztahů 9.6 a 9.7. Z takto vypočtených hodnot tepelných výkonů  $Q_c$  byl vyčíslen celkový denní výkon, kterého by bylo možné dosáhnout. Pro názornost bude uveden výpočet ztrátového výkonu z hodnot naměřených dne 17. 5. 2014.

#### **Ukázka výpočtu denního ztrátového výkonu:**

Protože hodnoty  $Q_c$  se během dne příliš neměnily, byl pro zjednodušení výpočtu spočítán z jejich dvaapadesáti hodnot aritmetický průměr, který je 365 W. Výpočet tedy bude vypadat následovně.

$$\int_0^{8,667} 365 \, dx = 3163,5 \, Wh = 3,164 \, kWh$$

Meze integrálu byly vypočteny s ohledem na celkovou dobu, kdy během denního měření tento stav trval. Je-li celkem zaznamenáno 52 stavů a interval měření je 10 minut, pak tedy celková doba je 8 hodin a 40 minut (dekadicky 8,667 hodiny).

Pro názornost můžeme také vyčíslit tepelný výkon, který by za normálního provozu systém dodal do zásobníku. Výpočet provedeme stejným způsobem, jen pro případy napětí  $U_{fv}$  většího než 10 V, tedy schopného roztočit oběhové čerpadlo.

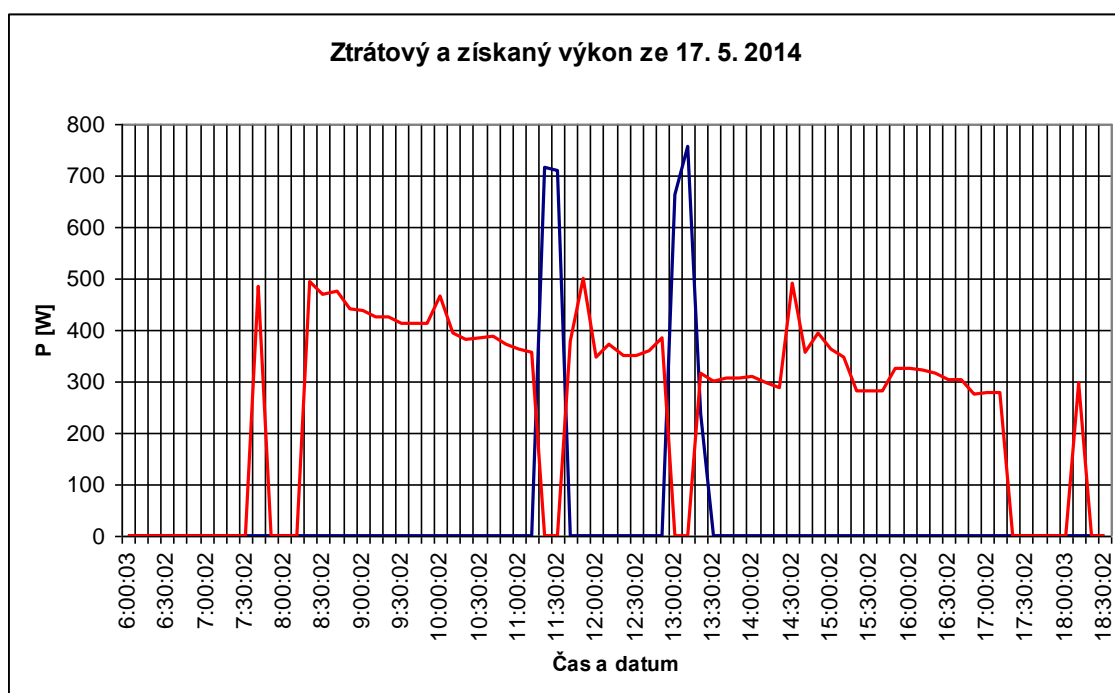
$$\int_0^{0,667} 711 \, dx = 474,24 \, Wh = 0,474 \, kWh$$

Systém by tento den získal tepelný výkon o velikosti 0,474 kWh.

## 10 VYHODOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

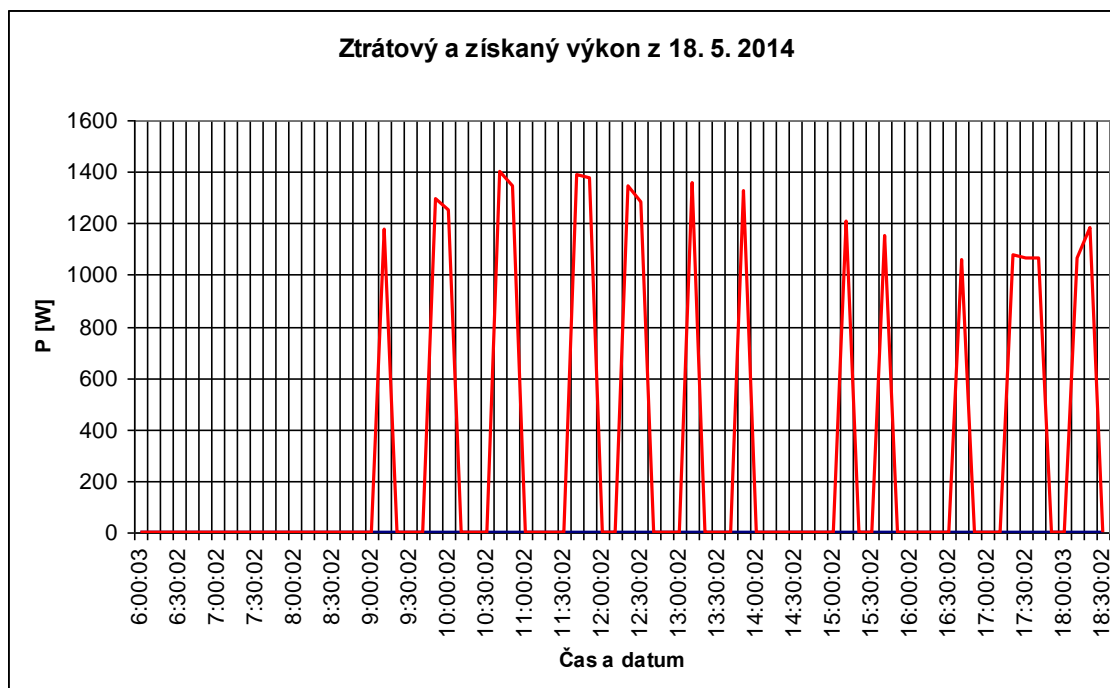
Naměřená data byla zpracována výše popsáním způsobem. Z těchto dat jsou patrné tři typy případů z hlediska ztrát a výkonu systému.

Prvních z nich jsou dny, kdy je zataženo a není tedy dostatek přímého slunečního záření. Příklady takovýchto dnů jsou patrné z obr. 10.1, 10.2 a 10.3. Červeně je vyznačen tepelný výkon, který by získala fototermická část systému, kdyby fotovoltaické panely měli dostatek energie pro činnost systému. Modře je vyznačen získaný tepelný výkon (resp. dodaný do tepelného zásobníku). V tyto dny bylo zataženo, ale stále dost teplo na to, aby fototermická část systému mohla pracovat. Celkový tepelný výkon, který mohl systém získat za tyto tři dny, činí 18,5 kWh. Reálný získaný výkon je však pouze 0,47 kWh, protože systém pracoval jen ve dvou krátkých úsecích jednoho dne.

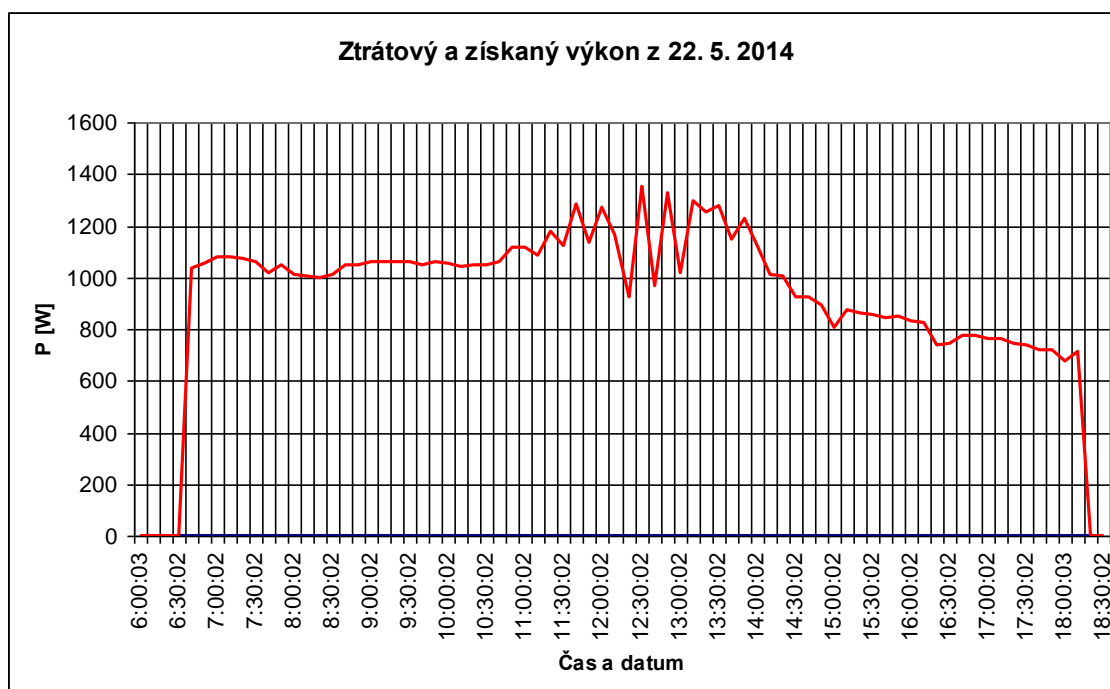


Obr 10.1: Hodnoty výkonů ze dne 17. 5. 2014





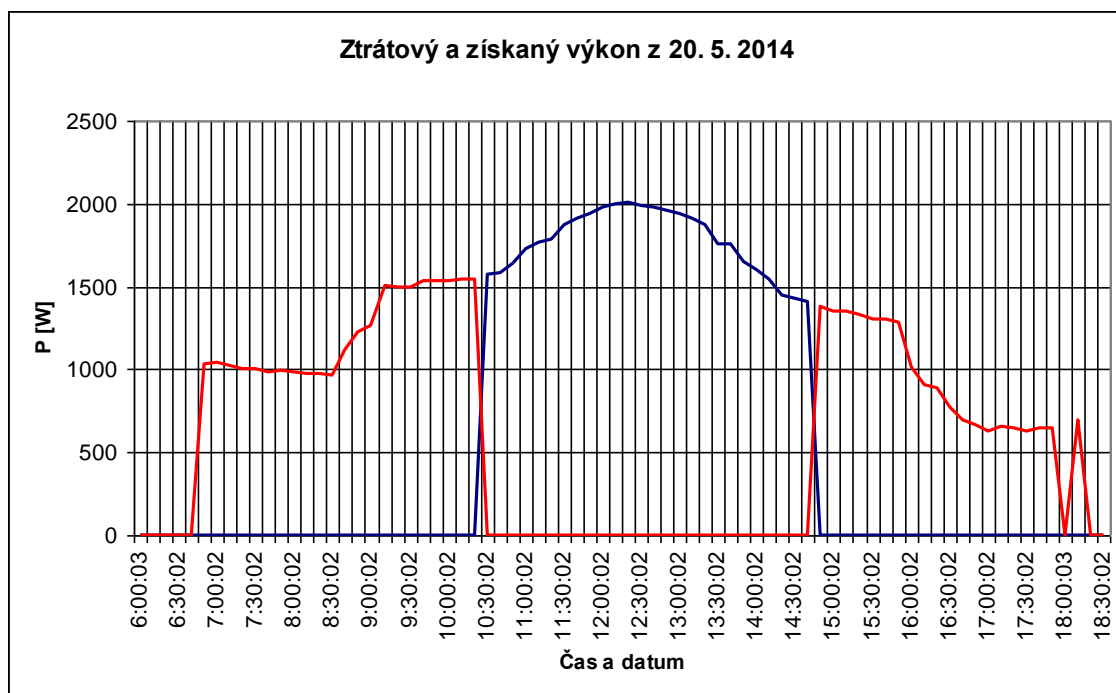
Obr 10.2: Hodnoty výkonů ze dne 18. 5. 2014



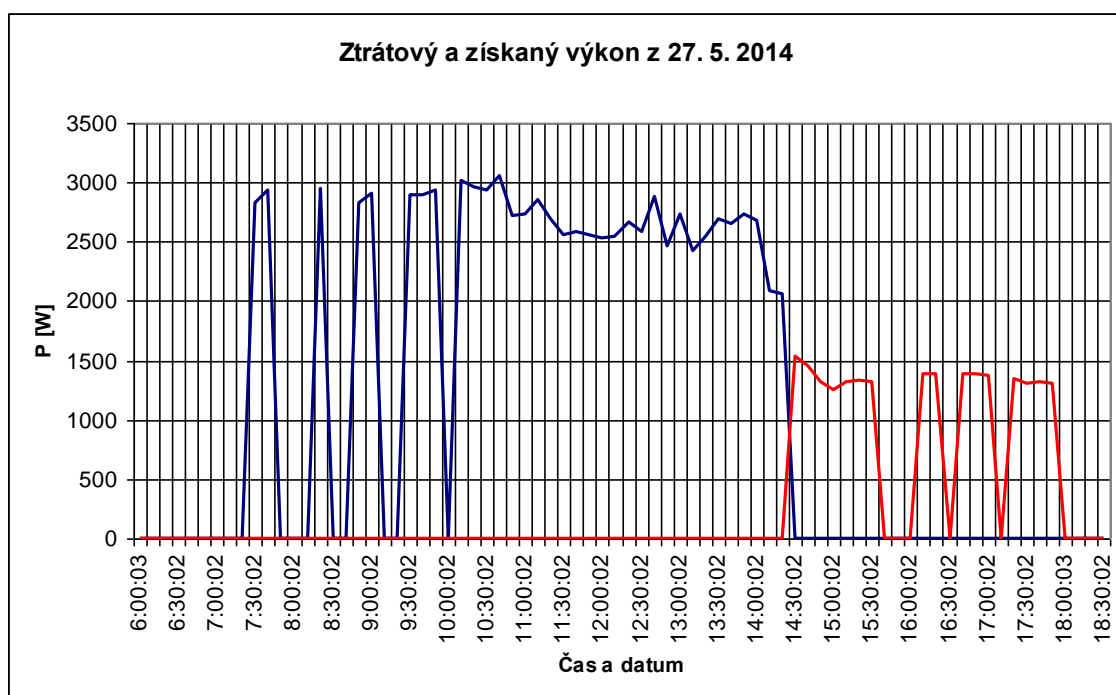
Obr 10.3: Hodnoty výkonů ze dne 22. 5. 2014

Další případem jsou dny, kdy se střídá slunečné a zamračené počasí. Takovéto počasí, jak je i patrné z obr. 10.4, nastalo při měření dne 20. 5. 2014. V tento den byl reálný získaný tepelný výkon roven hodnotě 7,38 kWh a dalších 7,41 kWh by bylo

možné získat, kdyby systém mohl pracovat celý den. V tento den systém pracoval pouze od 10:30 do 14:40 a oba výkony se téměř rovnají. Mohou však nastat i případy, kdy hodnoty obou výkonů budou více rozdílné jako na obr. 10.5.



Obr. 10.4: Hodnoty výkonů ze dne 20. 5. 2014

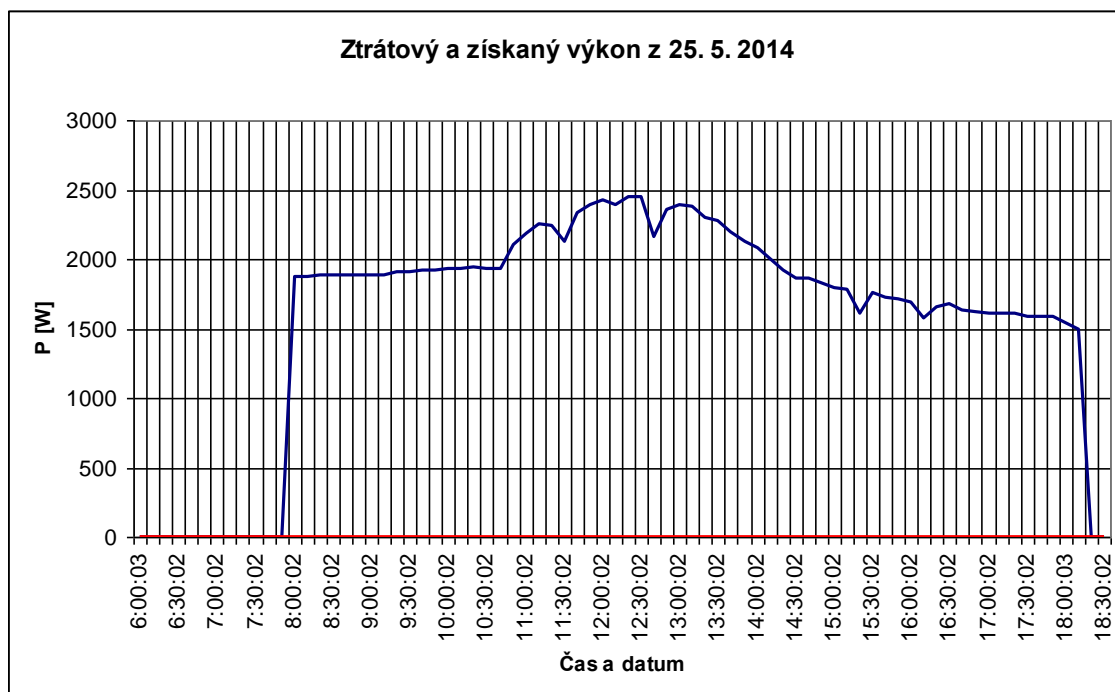


Obr. 10.5: Hodnoty výkonů ze dne 27. 5. 2014

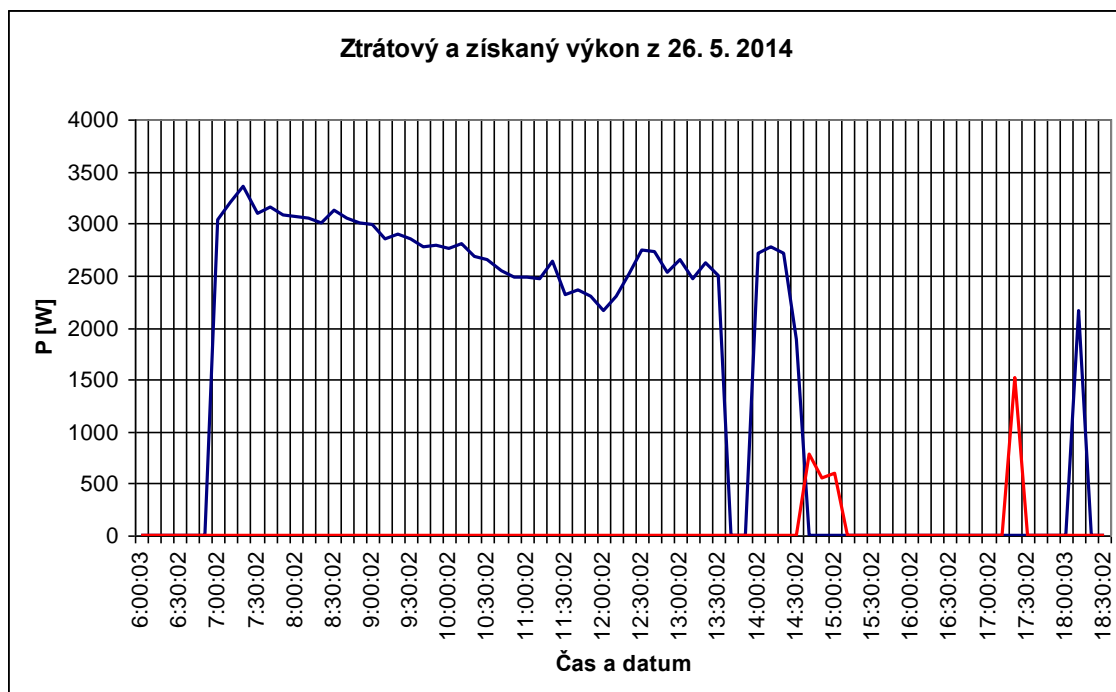
V tento den bylo slunečno, odpoledne ale přišla oblačnost a proto ztrátový výkon činí

3,62 kWh a získaný tepelný výkon 14,9 kWh.

Posledním případem jsou slunečné dny, kdy je ztrátový výkon minimální. V těchto dnech je dostatek slunečního svitu a dostatečné teplo pro práci celého systému. To je nejnázorněji vidět na obr. 10.6. V tento den byl nulový ztrátový výkon a systém tak za celý den získal maximální možný tepelný výkon 19,72 kWh. Podobná situace panovala i další den, což znázorňuje obr. 10.7 jen s tím rozdílem, že systém pracoval kratší dobu a získaný tepelný výkon dosáhl hodnoty přibližně 20 kWh a ztráty činily 0,57 kWh.



Obr. 10.6: Hodnoty výkonů ze dne 25. 5. 2014



Obr 10.7: Hodnoty výkonů ze dne 26. 5. 2014

Pro lepší názornost bude také uvedena tabulka (tab. 10.1) získaných tepelných výkonů a tepelných výkonů, kterých by bylo možné dosáhnout pro výše popsané případy.

Datum měření	Získaný tepelný výkon [kWh]	Ztrátový tepelný výkon [kWh]
<b>Málo slunečné dny</b>		
17. 5. 2014	0,474	3,1667
18. 5. 2014	0	3,901
22. 5. 2014	0	11,489
<b>Dny s proměnlivým počasím</b>		
20. 5. 2014	7,377	7,41
27. 5. 2014	14,9	3,62
<b>Slunečné dny</b>		
25. 5. 2014	19,723	0
26. 5. 2014	19,936	0,572

Tab. 10.1: Přehled tepelných výkonů

## 11 ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla prováděna ve spolupráci s brněnskou částí firmy Honeywell. Hlavním cílem bylo určit, zda jsou ztráty v solárním systému pro ohřev vody, díky omezenému výkonu fotovoltaických panelů, natolik významné, aby se vyplatilo investovat do systému další prostředky a zvýšit tak výkonnostní zisky. K tomuto účelu bylo navrženo a sestrojeno měřicí zařízení na základě minipočítače Raspberry Pi a v květnu 2014 provedeno vlastní měření na reálné instalaci systému v Židlochovicích u Brna.

V první řadě byl vytvořen matematický model systému na základě dat veřejně dostupných v evropském systému PVGIS a dat již změřených na tomto systému v jiné práci. Z takto zpracovaných dat bylo vyhodnoceno, že k největším ztrátám výkonu bude docházet v ranních a večerních hodinách tedy v době, kdy systém ještě nebo už nepracuje. Podle tohoto modelu byly předpokládány denní ztráty vyčísleny na hodnotu 2,53 kWh a teoretický denní výkon systému 35,5 kWh.

Dalším krokem byl návrh a vlastní měření na reálné instalaci systému s cílem zjistit skutečný objem získaného a ztrátového výkonu. Měření bylo prováděno s ohledem zahrnout do výsledků co možná nejčastější projevy počasí typické pro danou oblast a měsíc květen. Změřená data bylo rozhodnuto rozdělit do tří skupin. Při zatažené obloze dosahovaly ztráty systému hodnoty až 11,5 kWh a získaný výkon nebyl větší než 0,5 kWh. V případech, kdy se během dne střídalo zamračené a slunečné počasí byly ztrátové a získané výkony více vyrovnané. Během těchto dní závisel ztrátový výkon a získaný výkon na poměru doby, kdy bylo zamračeno a kdy bylo slunečno. Posledním případem byly slunečné dny. V těchto dnech nedosahoval ztrátový výkon větších hodnot než 0,6 kWh a získaný tepelný výkon se nepodařilo naměřit větší než 20 kWh. Na základě těchto měření nebyla potvrzena domněnka, že ke ztrátám dochází v ranních a večerních hodinách, kdy systém v důsledku slabého příkonu fotovoltaických panelů nemůže pracovat. Daleko větší význam z hlediska ztrát má nestálost slunečního svitu během dne v důsledku tvorby oblačnosti. Nelze však vyloučit, že ke ztrátám v ranních a večerních hodinách nedochází v jiných měsících, zejména na počátku a konci letního období. To by však potvrdila nebo vyvrátila až dlouhodobá měření (alespoň jeden rok). Pro lepší přesnost vyčíslených výkonů by bylo také vhodnější použít k měření intenzity slunečního svitu zařízení k tomu určené (např. pyranometr) než používat výpočet intenzity slunečního svitu na základě napětí na fotovoltaickém panelu a také provést dlouhodobá měření.

Jelikož ztrátový výkon dosahoval v některých dnech jednotek až desítek kWh, bylo by přínosné přistoupit k posílení fotovoltaické části systému. Nejvhodnějším řešením by bylo doplnit systém o třetí fotovoltaický panel stejného typu jako již použité panely. Dalším řešením by bylo použití malého flexibilního fotovoltaického panelu. Tyto panely se vyznačují velmi snadnou instalací a jejich ceny za nejnižší výkonové provedení se pohybují v řádech stovek korun. O něco odlišným řešením by bylo použití zálohovacího akumulátoru, který by se během slunečních dní, při dostatku (až přebytku) energie z fotovoltaických panelů dobíjel a ve dnech, kdy by bylo slunečního svitu málo,

by oběhovému čerpadlu dodával energii. Opět se jedná o řešení v řádech stovek korun.

# LITERATURA

- [1] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha : Grada, 2013. ISBN 978-80-24-73525-2.
- [2] KOKEŠ. *Solární kolektory* [online]. [cit. 2.1.2014]. Dostupný na WWW: [http://www.ballbrno.cz/html\\_cz/produkty-kolektory.html](http://www.ballbrno.cz/html_cz/produkty-kolektory.html)
- [3] HROMÁDKA. *Sluneční kolektor WSS 300 vertikální, letovací* [online]. [cit. 2.1.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.energiezeslunce.cz/store/goods-S1543-66-slunecni-kolektor-wss-300-vertikalni-letovaci.html>
- [4] MATUŠKA, Tomáš. *Typy solárních kolektorů* [online]. [cit. 2.1.2014]. Dostupný na WWW: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/typy-solarnich-kolektoru>
- [5] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2013, ISBN 978-80-247-3525-2.
- [6] VLK, Jiří. *Zapojení solárních systémů* [online]. [cit. 2.1.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.vermos.cz/?q=node/101>
- [7] MÍČKOVÁ, Petra. Kvantifikace energetického přínosu řídicí jednotky solárního systému : bakalářská práce. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 45 l, 27 l. a 1 CD-ROM příl. Vedoucí bakalářské práce Václav Zeman.
- [8] KURTIN. *ecocirc D5 Vario* [online]. [cit. 2.1.2014]. Dostupný na WWW: [http://www.laing.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1&Itemid=2](http://www.laing.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=1&Itemid=2)
- [9] PV potential estimation utility [online]. [cit. 26.5.2014]. Dostupný na WWW: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>

# SEZNAM VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

$TUV$	teplá užitková voda
$G, E$	sluneční záření
$G_b$	přímé sluneční ozáření
$G_d$	difuzní sluneční ozáření
$\eta$	tepelná účinnost
$Q_k$	okamžitý tepelný výkon
$K_\Theta$	modifikátor úhlu dopadu
$T$	časová konstanta
$_dT$	rozdíl teplot
$T_{out}, T_{in}$	výstupní a vstupní teplota zásobníku
$U_{\dot{c}}, \epsilon U_{real}$	napětí na čerpadle
$U_{fv}, U_{fv real}$	napětí na fotovoltaických panelech
$t_{abs}$	střední teplota povrchu absorbéru
$t_m$	střední teplota teplotonosné kapaliny
$t_e$	teplota okolí
$C$	tepelná konstanta
$A_k$	vztažná plocha kolektoru
$A_A$	plocha absorbéru
$A_a$	plocha apertury
$A_G$	celková obrysová plocha
$\tau \cdot \alpha$	optická účinnost kolektoru
$U$	součinitel prostupu tepla kolektoru
$F'$	účinnostní součinitel kolektoru
$F$	průtok
$c$	měrná tepelná kapacita
$\rho$	hustota
$P, Q$	výkon
$P_{ztr1}, P_{ztr2}$	ztrátový výkon
$P_m$	celkový výkon
$Q_c$	celkový výkon
$\eta_{fv}, \eta_{ft}$	účinnost fotovoltaických a fototermických panelů



$\eta_0$	účinnost solárního kolektoru při nulovém teplotním spádu
$S_{fv}$ , $S_{ft}$	plocha fotovoltaických a fototermických panelů
$a_1$	lineární součinitel tepelné ztráty
$a_2$	kvadratický součinitel tepelné ztráty
<i>LED</i>	light emitting diode
<i>PN</i>	polovodičový přechod P-N
<i>GaAs</i>	galium – arsen
<i>TiO<sub>2</sub></i>	oxid titaničitý
<i>2D</i>	dvourozměrný
<i>3D</i>	třírozměrný
<i>R1</i> , <i>R2</i>	elektronické regulátory
<i>VV8</i> , <i>VV8-A</i> , <i>VV-A-F</i>	typové označení solárních kolektorů firmy Vermos s.r.o.
<i>RPi</i>	mikropočítač Raspberry Pi
<i>GPIO</i>	vstupně-výstupní port
<i>UART</i> , <i>I2Cm</i> , <i>SPI</i>	datová sběrnice
<i>HDMI</i>	high definition multimedia interface
<i>LAN</i>	local area network
<i>SD</i>	paměťové úložiště typu Secure Digital
<i>USB</i>	universal seriál bus
<i>A/D</i>	analogově-digitální převod
<i>wi-fi</i>	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
<i>HTML</i>	HyperText Markup Langure
<i>IP</i>	internet protokol
<i>FV</i>	fotovoltaický
<i>.csv</i>	formát souboru pro ukládání měřených dat

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Zdrojový kód měřicího programu</b>	<b>48</b>
A.1	Kód měřicího programu v jazyce Python .....	48
<b>B</b>	<b>skripty pro výpočty v programu matlab</b>	<b>51</b>
B.1	Výpočet výkonu pro stanovení modelového dne.....	51
B.2	Výpočet tepelného výkonu systému .....	52
B.3	Zpětný výpočet intenzity světla .....	52
<b>C</b>	<b>Grafy</b>	<b>53</b>
C.1	Závislost výkonu na denní době .....	53
C.2	Graf ztrátového a získaného výkonu ze 17. 5. 2014 .....	54
C.3	Graf ztrátového a získaného výkonu z 18. 5. 2014.....	55
C.4	Graf ztrátového a získaného výkonu z 20. 5. 2014.....	56
C.5	Graf ztrátového a získaného výkonu z 22. 5. 2014.....	57
C.6	Graf ztrátového a získaného výkonu z 25. 5. 2014.....	58
C.7	Graf ztrátového a získaného výkonu z 26. 5. 2014.....	59
C.8	Graf ztrátového a získaného výkonu z 27. 5. 2014.....	60

# A ZDROJOVÝ KÓD MĚŘICÍHO PROGRAMU

## A.1 Kód měřicího programu v jazyce Python

```
import time
import datetime
import glob
import subprocess
import RPi.GPIO as GPIO
import sys
import os
import locale
import quick2wire.i2c as i2c
import atexit
import math

adc_address1 = 0x68
adc_address2 = 0x69

varDivisor = 64 # from pdf sheet on adc addresses and config
varMultiplier = (2.4705882/varDivisor)/1000

logfilename = "output/output.csv"
htmlfilename = "/var/www/index.html"

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GREEN_LED = 22
GPIO.setup(GREEN_LED, GPIO.OUT)

# Zde rozsvitime led diodu k indikaci behu programu
GPIO.output(GREEN_LED, True)

# pokud ukoncime skript nasilne, resetuji se piny, at nezustane po
ukonceni skriptu treba svitit ledka nebo zapnute rele - pokud to
nepotrebujes, smaz nasledujici radek a "import atexit"
atexit.register(GPIO.cleanup)

with i2c.I2CMaster() as bus:

    def changechannel(address, adcConfig):
        bus.transaction(i2c.writing_bytes(address,
adcConfig))

    def getadcreading(address):
        h, m, l, s = bus.transaction(i2c.reading(address,4))[0]
        while (s & 128):
            h, m, l, s =
bus.transaction(i2c.reading(address,4))[0]
        # shift bits to product result (zamena bitu pro spravny
vysledek)
        t = ((h & 0b00000001) << 16) | (m << 8) | l
        # check if positive or negative number and invert if needed
```

```

(zkontroluje pozitivni a negativni hodnotu a invertuje ji v pripade
potreby)
    if (h > 128):
        t = ~(0x020000 - t)
    return t * varMultiplier

def convert(voltage):
    Rt = (voltage * 4.7e3)/ (4.6-voltage) # 4k7 ohm
    if Rt < 0:
        Rt = -Rt
    temp = -33.33 * math.log(Rt) + 273.15
    return temp #temp + 273.15

# funkce na proiterovani w1 zarizeni s ID zacinajicim na 28-....
a vycteni jejich teplot z logu
def read_temps():
    encoding = locale.getdefaultlocale()[1]
    temps = []
    for sensor_path in glob.glob('/sys/bus/w1/devices/28-
*/w1_slave'):
        crc_ok = False
        tries = 0
        while not crc_ok and tries < 20:
            # Bitbang the 1-wire interface.
            sensor_output = subprocess.check_output('cat '
+ sensor_path, shell=True).strip()
            lines =
sensor_output.decode(encoding).split('\n')
            line0 = lines[0].split()
            if line0[-1] == 'YES': # CRC check was good.
                crc_ok = True
                line1 = lines[1].split()
                temp = float(line1[-1][2:])/1000
                temps.append(temp)
            else:
                # Sleep approx 20ms between attempts
                time.sleep(0.02)
            tries += 1
    return temps

now_datetime = datetime.datetime.now()
formatted_datetime = now_datetime.strftime('%Y-%m-%d-%H:%M:%S')
# YYYY-MM-DD-HH-MM-SS

with open(logfilename, "a") as output:

    temps = read_temps() # vrati pole teplot
    temp1 = temps[0]
    temp2 = temps[1]

    changechannel(adc_address1, 0x9C)
    voltage_A1 = getadcreading(adc_address1) # voltage of first
analog input
    changechannel(adc_address1, 0xBC)
    voltage_A2 = getadcreading(adc_address1) # voltage of
second analog input
    output.write("%s,%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n" %
(formatted_datetime, temp1, temp2, voltage_A1, voltage_A2) ) #
zalogujeme do souboru

```

```

#print("%s\t%.3f\t%.3f\t%.3f\t%.3f" % (formatted_datetime, temp1,
temp2, voltage_A1, voltage_A2) ) # vypiseme do konzole

# vygenerujeme html vystup
with open(htmlfilename, 'w') as html:
    html.write("<html><head><title>Temperature          and
voltage</title><script
src='sorttable.js'></script></head><body><table    class='sortable'
border='1px        solid'><tr><th>Date          and          time</th><th>Vyst
zasobnik</th><th>Vst zasobnik</th><th>Ucerp</th><th>Ufv</th></tr>")
    with open(logfilename, 'r') as csv:
        for line in csv:
            values = line.split(",")
            html.write("<tr>")
            for value in values:
                html.write("<td>%s</td>"%(value))
            html.write("</tr>")
    html.write("</table></body></html>")

# Zde zhasneme led diodu k indikaci konce behu
GPIO.output(GREEN_LED, False)
#GPIO.cleanup() # resetujeme stavy na GPIO pinech

```

## B SKRIPTY PRO VÝPOČTY V PROGRAMU MATLAB

### B.1 Výpočet výkonu pro stanovení modelového dne

```
E=171;      %[278, 371, 485, 540, 581, 597, 581, 540, 485, 371, 278,
227];      %stredni intenzita zarení W/m2 pro kazdy mesic
a=0.122;    %sirka m
b=0.760;    %delka m
S=a*b*0.92; % predpokladana efektivni plocha
Eta=0.14;   % predpokladana ucinnost
Um=7.3;     %napeti pri P maximalni
Im=1.4;     %proud pri P maximalni
P=E*S*Eta;  % P teoreticky - pro jeden panel
U=sqrt(P/0.192)

%%
%Vypocet prutoku cerpaldem v zavislosti na napeti na cepadle za
hodinu
Uc=U/2;     %Napeti na cepadle [V] - 2xU - dva FV
            %clanky v serii

if((6.6<=Uc) & (Uc<=8))
    F=163.266341*(Uc-6.6)^3-764.287163*(Uc-6.6)^2+1500*(Uc-6.6);
%litru za hodinu
    F=(F/1000/3600) %m3 za hodinu / m3 za sekundu
end
if((8<Uc) & (Uc<12))
    F=6.673256*(Uc-8)^3-78.568532*(Uc-8)^2+320.002028*(Uc-8)+1050;
    F=(F/1000/3600)
end
if((12<=Uc) & (Uc<=24))
    F=-0.091874*(Uc-12)^3+1.510543*(Uc-12)^2+11.770073*(Uc-12)+1500;
    F=(F/1000/3600)
end

%%
%Vypocet vykonu FT systemu - uvazovano pro ethylenglykol
ro=1110;    %hustomedia?
c=3630;     %merna tepelna kapacita media
T0=25.684;  %teplota media na vystupu z kolektoru
T1=51.536;  %teplota media na vstupu do kolektoru
V=0.0058;   %objem kapaliny v kolektorech v m3

Pft=F*ro*c*(T1-T0) %W
Cerp=V/F;         %doba behu cepadla resp. doba
precerpani kapaliny o objemu 0.0058 m3

Pj=Cerp*Pft;      % ziskana energie v Joule (Ws)
Pjkw=Pj/3600/1000; %kWh
```

## B.2 Výpočet tepelného výkonu systému

```
E=[236]; %[278, 371, 485, 540, 581, 597, 581, 540, 485, 371, 278,
227];      %stredni intenzita zarení W/m2 pro kazdy mesic

%% Vypocet výkonu FT systému - uvazovano pro ethylenglykol
ro=1110;      %hustomedia
c=3630;      %merna tepelna kapacita media
T0=[43.06];  %teplota media na vystupu z kolektoru
T1=[39.38];  %teplota media na vstupu do kolektoru
dt=3.837;

%% Vypocet teoretickeho ziskatelneho tepla z kolektoru
Sftb=1.45;    %cinna plocha kolektoru v m2
Sfts=1.45;    %cinna plocha kolektoru v m2
Eta0b=0.75;   % prumerna opticka ucinnost
kolektoru- bez reflektoru
alb=1.5;
a2b=0.008;
Eta0s=0.82;   % prumerna opticka ucinnost
kolektoru- s reflektorem
als=1.65;
a2s=0.0046;
Tm=(T1+T0)./2; % °C pro chladnejsi obdobi 25°C,
pro teplejsi 32.5°C
Te=19.4;      %Teplota okolí

%% Vypocet teoretickeho mnozstvi ziskaneho tepla - kolektor bez
absorberu
Etab=Eta0b-alb*((Tm-Te)./E)-a2b*((Tm-Te).^2./E); %strana 54
Qb=Etab.*E.*Sftb; %mnozstvi tepla
odvadeneho teplonosnou latkou v kWh

% Vypocet teoretickeho mnozstvi ziskaneho tepla - kolektor s
absorberem
Etas=Eta0s-als*((Tm-Te)./E)-a2s*((Tm-Te).^2./E);
Qs=Etas.*E.*Sfts;

%Teoretickeho mnozstvi tepla z cele sestavy
Qc=(Qs+Qb).*2 %W
```

## B.3 Zpětný výpočet intenzity světla

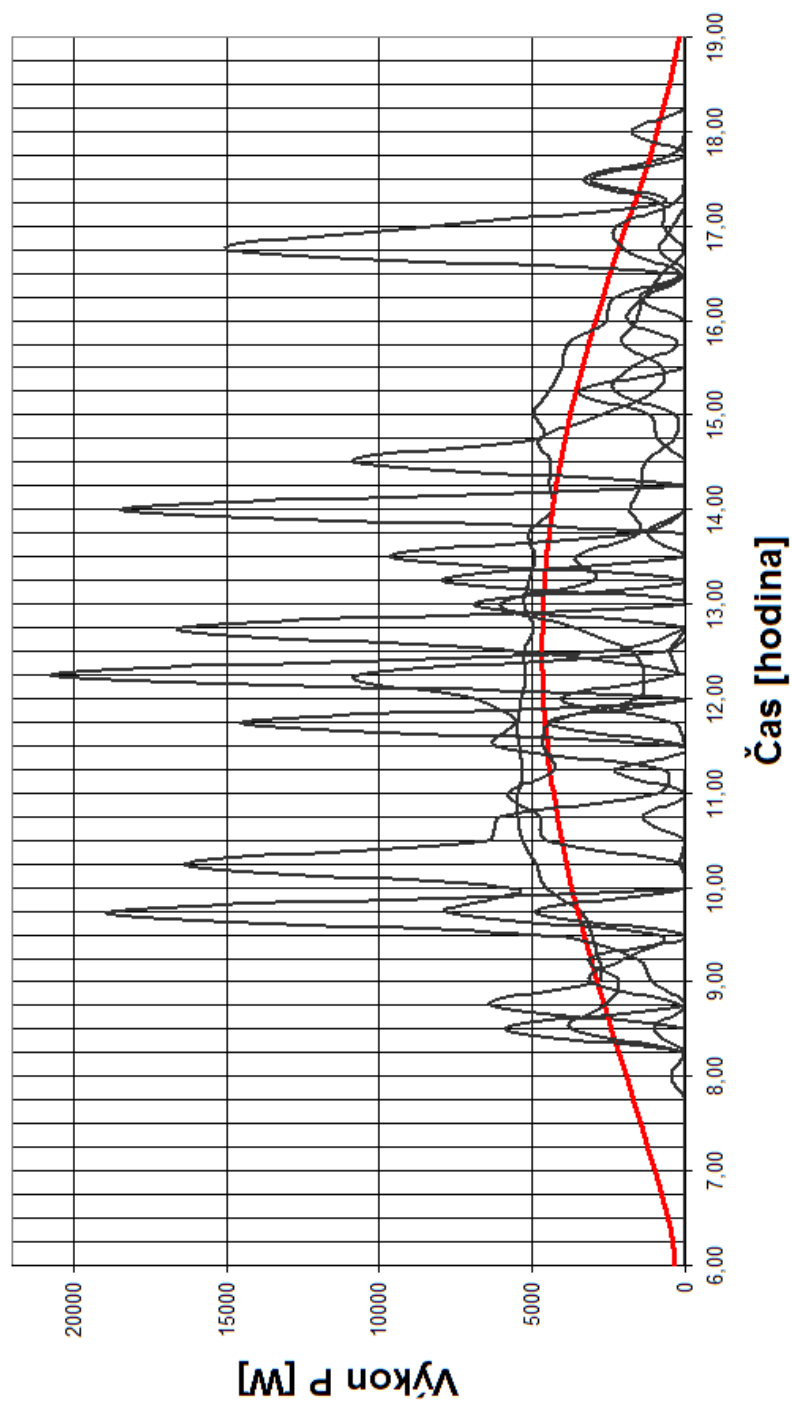
```
U=[ 7.66 ];
U=U/2;
a=0.122; %sirka m
b=0.760; %delka m
S=a*b*0.92; % predpokladana efektivni plocha
Eta=0.14;

E=(0.192*(U.^2))/(S*Eta) % zpětný výpočet intenzity světla E -
hodnotu napětí nedělíme dvěma
```

## C GRAFY

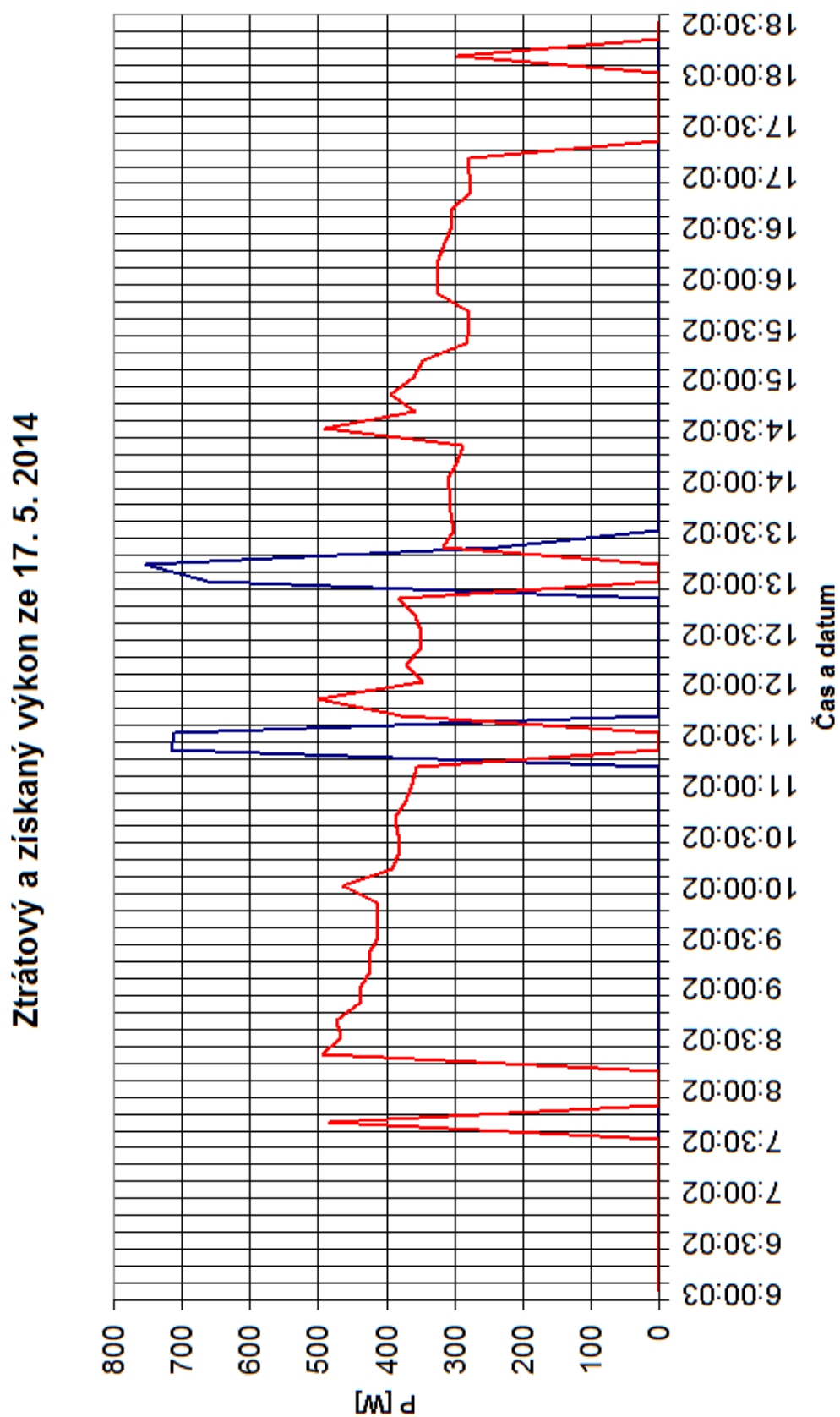
### C.1 Závislost výkonu na denní době

Graf závislosti výkonu na denní době



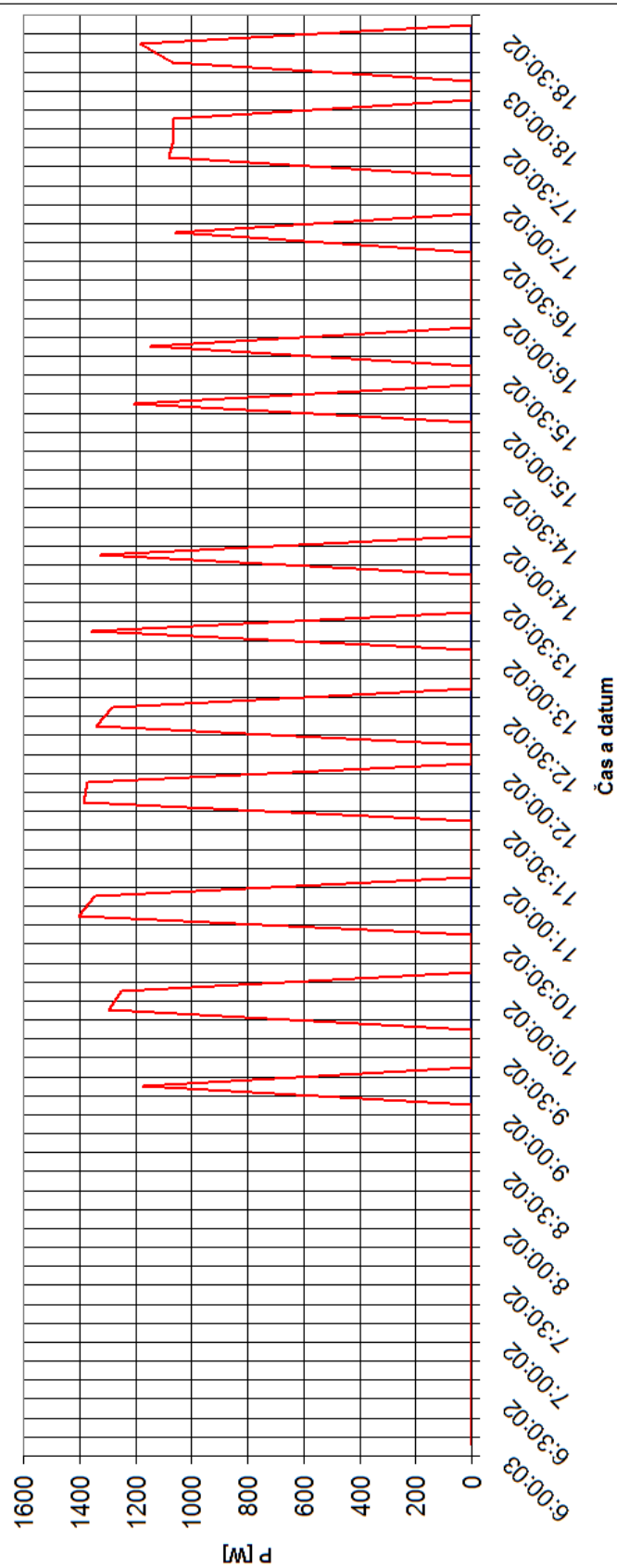


## C.2 Graf ztrátového a získaného výkonu ze 17. 5. 2014

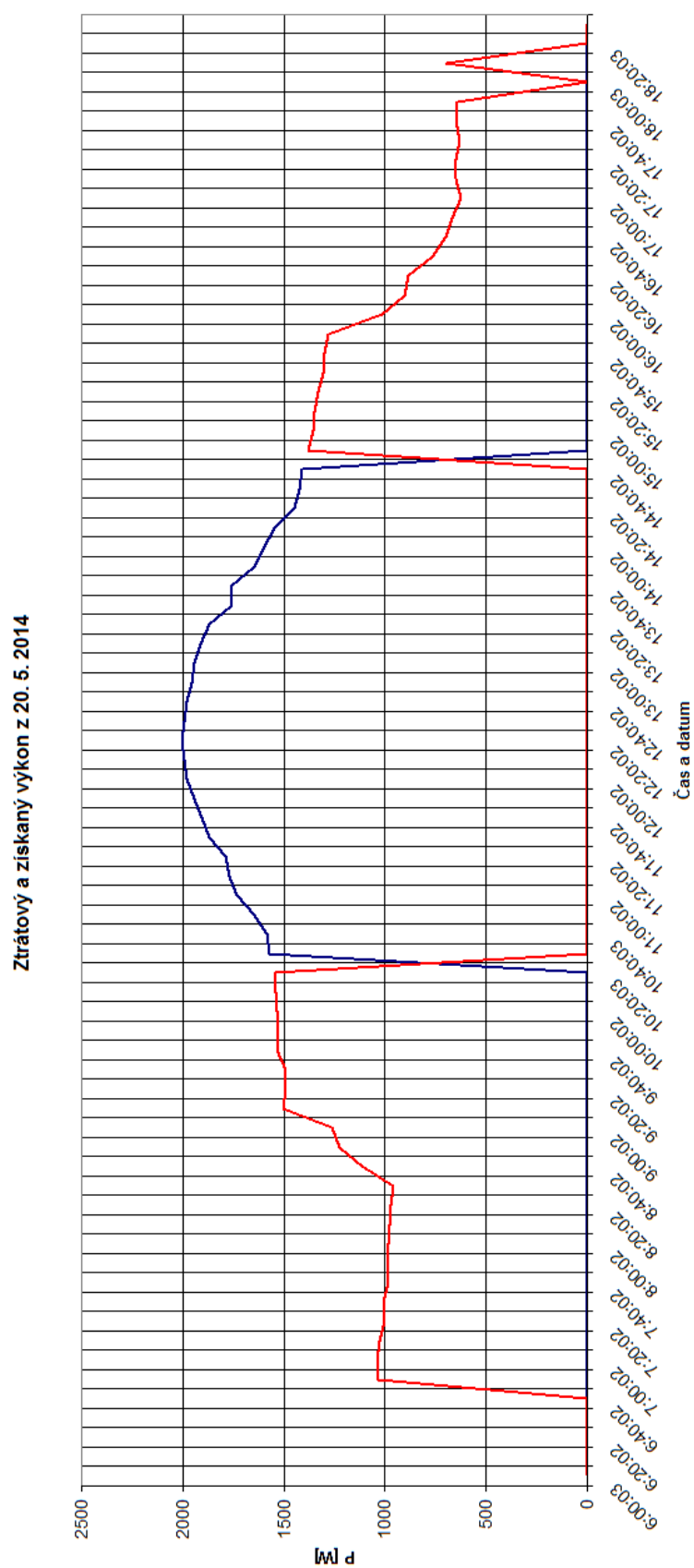


### C.3 Graf ztrátového a získaného výkonu z 18. 5. 2014

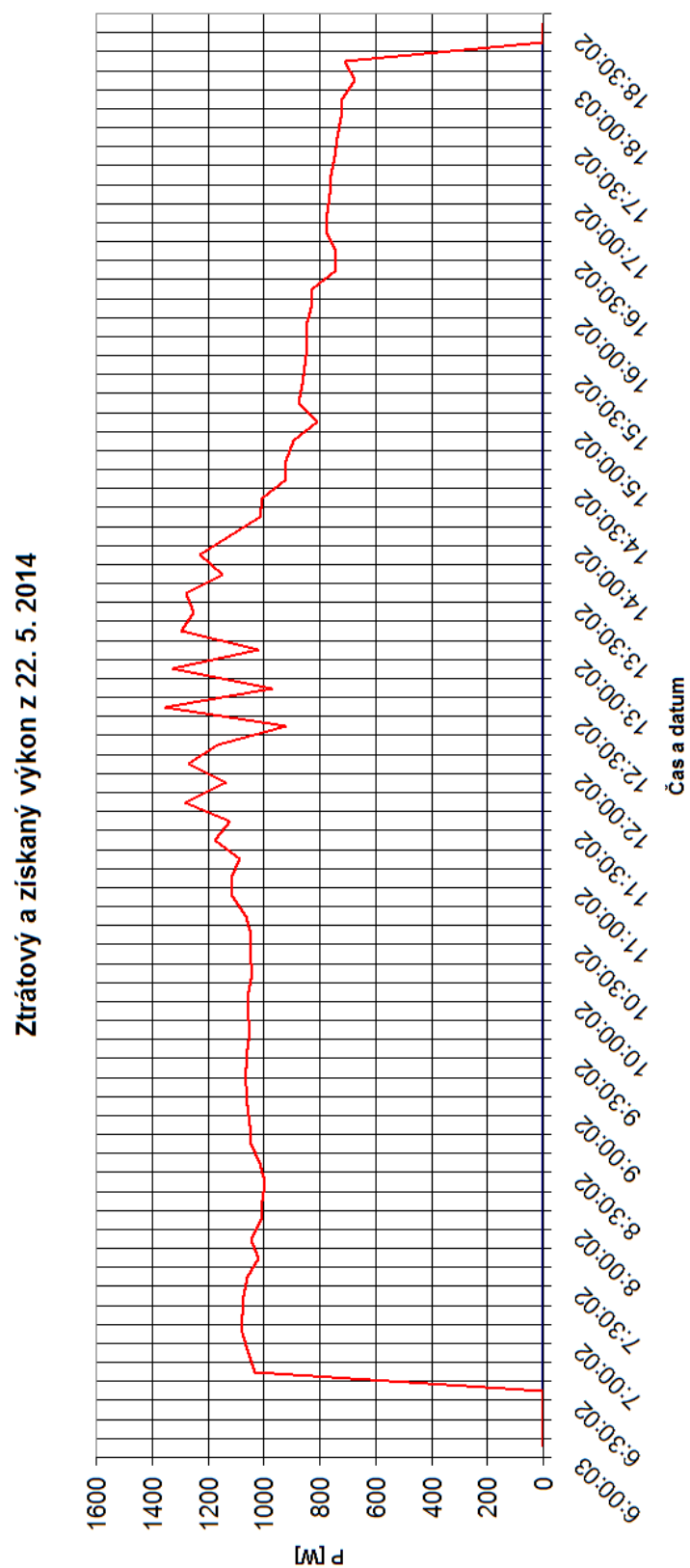
Ztrátový a získaný výkon z 18. 5. 2014



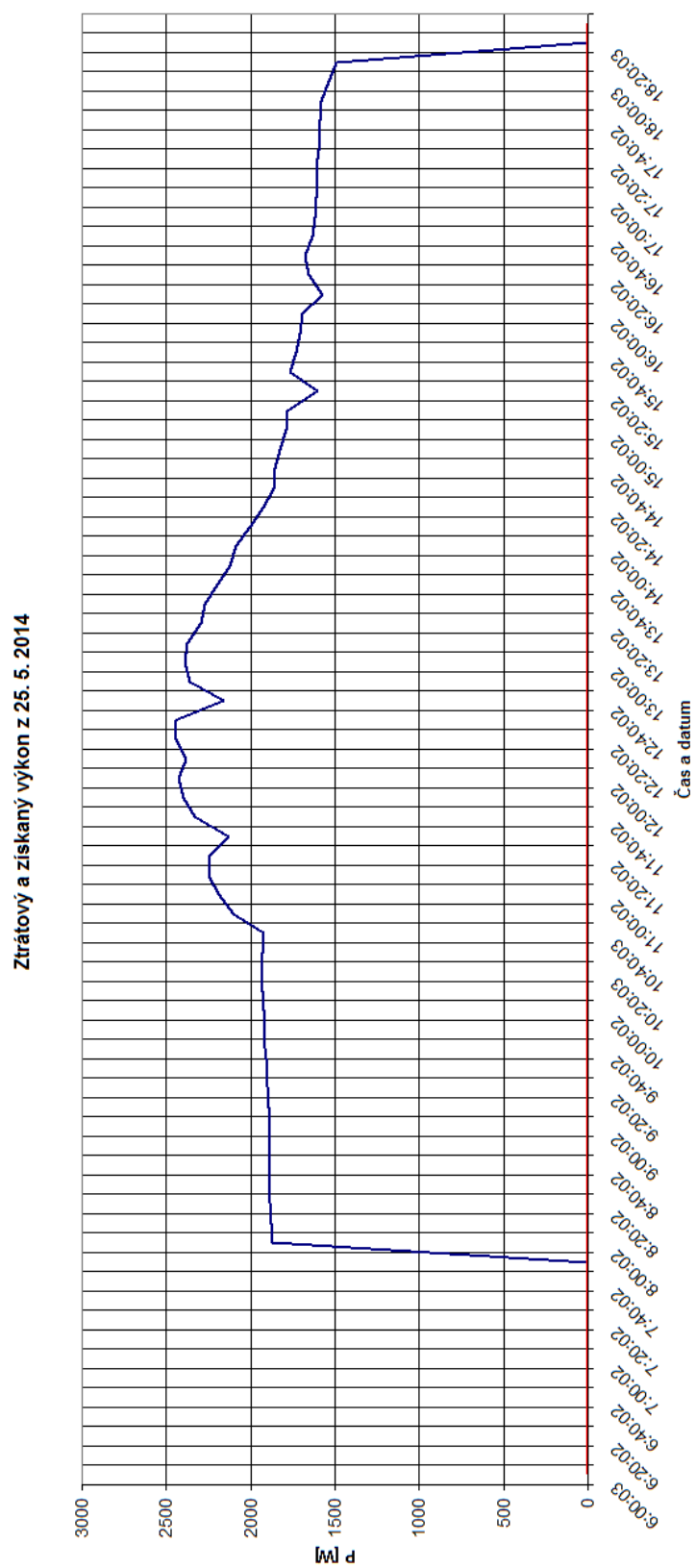
## C.4 Graf ztrátového a získaného výkonu z 20. 5. 2014



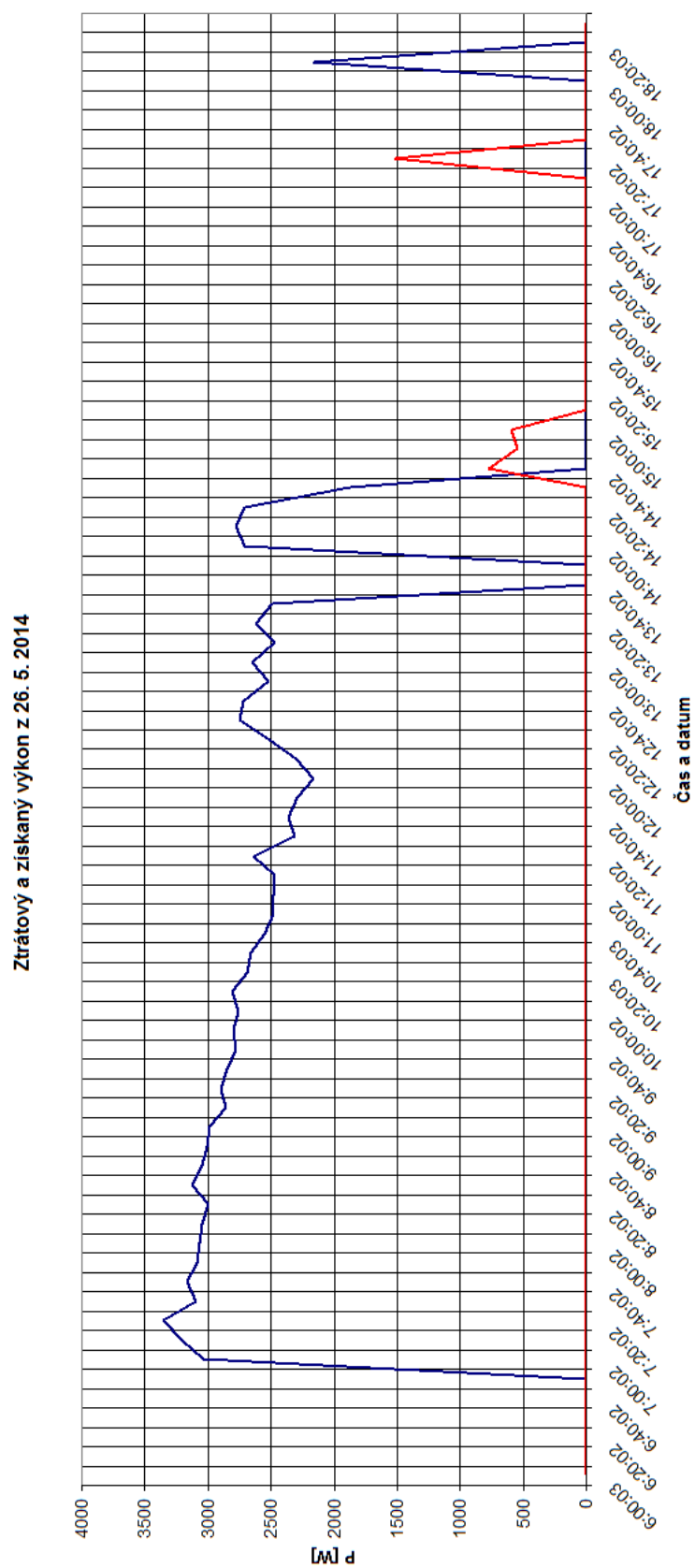
## C.5 Graf ztrátového a získaného výkonu z 22. 5. 2014



## C.6 Graf ztrátového a získaného výkonu z 25. 5. 2014



## C.7 Graf ztrátového a získaného výkonu z 26. 5. 2014



## C.8 Graf ztrátového a získaného výkonu z 27. 5. 2014

Ztrátový a získaný výkon z 27. 5. 2014

